



**UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIENCIAS DE LA TIERRA**

**“RECUPERACION DE ENERGIA DESDE CALOR PERDIDO DE ESCORIA EN
PROCESO DE FUNDICION DE COBRE”**

**“PARTE 2 : ESTUDIO TERMODINÁMICO DE GRANALLA DE ESCORIA A DIFERENTES
CONCENTRACIONES DE COBRE ALTA Y BAJA TEMPERATURA”**

**NATALIA CAROLINA CEPEDA LÓPEZ
Y
VANNIA ALEJANDRA TORRES MUÑOZ**

PROFESOR GUÍA: Ph.D. SERGIO RIVERA

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN MINAS**

**SANTIAGO – CHILE
Enero, 2019**



FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIENCIA DE LA TIERRA
DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y PROPIEDAD

Yo, **Natalia Cepeda y Vannia Torres**, declaramos que este documento no incorpora material de otros autores sin identificar debidamente la fuente.

Santiago, enero de 2019

Firma del alumno Natalia Cepeda

Firma del alumno Vannia Torres

AGRADECIMIENTOS

Vannia Torres Muñoz

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento al director de esta tesis, Sr. Sergio Rivera, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde que llegué a esta facultad. Asimismo, agradezco a mis compañeras de Carrera por su apoyo personal y humano, especialmente a Natalia Cepeda y Camila Faúndez, con quien he compartido proyectos e ilusiones durante estos años.

Pero un trabajo de investigación es también fruto del reconocimiento y del apoyo vital que nos ofrecen las personas que nos estiman, sin el cual no tendríamos la fuerza y energía que nos anima a crecer como personas y como profesionales. Gracias a mi familia, a mis padres y a mi hermana, que siempre estuvieron en los momentos que más los necesité para poder continuar.

Gracias a mis amigos, que siempre me han prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo y esta profesión. Sin su apoyo este trabajo nunca se habría escrito y, por eso, este trabajo es también el suyo. A todos, muchas gracias.

Natalia Cepeda López

A lo largo de mi desarrollo de trabajo de tesis he contado con la ayuda de muchas personas, a las que debo mi gratitud. En primer lugar, a mis padres, por haberme apoyado en cada decisión sin importar lo descabellada que fuera, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien y no desistir, pero más que nada, por su gran amor incondicional que me entregan cada día, sin importar las adversidades que han enfrentado. A mi hermana Claudia Cepeda que a pesar de ser estricta y enojona es un excelente ejemplo de una hermana mayor, sin ella hubiera sido más complicado este proceso.

En segundo lugar, al Profesor Sergio Rivera por su gran apoyo y motivación para el término de nuestros estudios profesionales. Por su colaboración en la elaboración de esta tesis, entregando su tiempo y cocimientos para impulsar el aprendizaje de nuestra formación profesional, fomentando la investigación de nuevas ideas innovadoras en el rubro.

En tercer lugar, a mis amigos que a pesar de los momentos buenos y malos seguimos hoy, tan amigos como siempre. Marcela Gómez que cada vez que podíamos vernos me cargaba con cajas de polvos mágicos y buena vibra para culminar mis estudios, la cual posee una virtud que envidio tanto, de estar siempre de buen humor, con una sonrisa, quitándole importancia a las penas y animarme hasta el final. Camila Faundez y Vannia Torres sin ellas la universidad no hubiera sido la misma, son excelentes personas, junto a ellas he compartido muchas experiencias y emociones que hoy guardo en mi corazón como un tesoro, gracias por estar siempre a mi lado y dispuestas a ayudarme en cualquier cosa. Michelle Urrea sin esperar nada a cambio, me ofreciste tu apoyo, tiempo, cariño y ánimos, eres una bella persona, agradezco a la vida por ponerte en mi camino. Patricia Macaya desde el primer día hasta el último animándome y aconsejándome en todos mis proyectos y sueño.

Y finalmente pero no menos importante a muchos amigos y amigas, que siempre me han apoyado con palabras de ánimo como Ninoska Nuñez, Natalia Diaz, Nicol Vargas, Yasna Pranao, Carolina Oliveros, entre otras personas.

ÍNDICE GENERAL

<u>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</u>	<u>1</u>
1.1 PRESENTACIÓN DEL TEMA	1
1.2. DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
1.3. CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO Y SU IMPORTANCIA	6
1.4. OBJETIVO GENERAL	7
1.4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
OBJETIVOS EXPERIMENTALES	7
OBJETIVOS DEL DISEÑO	7
1.5. ESTADO DEL ARTE / ALCANCE	8
<u>CAPITULO II MARCO TEÓRICO</u>	<u>9</u>
2.1 ESCORIA	9
2.2 ORIGEN DE LA ESCORIA	10
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA ESCORIA	12
2.4 FUNDICIONES EN CHILE	13
2.5 CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECIFICA	19
<u>CAPITULO III METODOLOGÍA</u>	<u>21</u>
3.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	22
3.1.1 CALIBRACIÓN Y HOMOGENEIDAD DEL CALORÍMETRO	22
3.1.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	25
<u>CAPITULO IV MODELAMIENTO MATEMÁTICO</u>	<u>34</u>
4.1 MODELO TERMODINÁMICO	37
<u>CAPÍTULO V DISCUSIONES GENERALES</u>	<u>40</u>
<u>CAPÍTULO VI CONCLUSIONES</u>	<u>42</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>45</u>
<u>ANEXOS</u>	<u>45</u>

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ESCORIA DE COBRE	12
TABLA 2 CAPACIDAD DE TRATAMIENTO DE LAS FUNDICIONES DE CHILE	18
TABLA 3 CP. CORRESPONDIENTE A CADA SLAG	29
TABLA 4 PARÁMETROS POLINOMIALES	34
TABLA 5 PARÁMETROS LINEALES PARA EL CÁLCULO CP.	37
TABLA 6 DATOS CALCULADOS DE CP.	38
TABLA 7 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 800°C	IV
TABLA 8 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 800°C	IV
TABLA 9 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 800°C	IV
TABLA 10 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 800°C	V
TABLA 11 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 800°C	V
TABLA 12 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 800°C	V
TABLA 13 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 800°C	VI
TABLA 14 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 800°C	VI
TABLA 15 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 800°C	VI
TABLA 16 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 800°C	VII
TABLA 17 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 800°C	VII
TABLA 18 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 800°C	VII
TABLA 19 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 800°C	VIII
TABLA 20 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 800°C	VIII
TABLA 21 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 800°C	VIII
TABLA 22 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 700°C	IX
TABLA 23 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 700°C	IX
TABLA 24 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 700°C	IX
TABLA 25 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 700°C	X
TABLA 26 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 700°C	X
TABLA 27 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 700°C	X
TABLA 28 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 700°C	XI
TABLA 29 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 700°C	XI
TABLA 30 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 700°C	XI
TABLA 31 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 700°C	XII
TABLA 32 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 700°C	XII
TABLA 33 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 700°C	XII
TABLA 34 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 700°C	XIII
TABLA 35 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 700°C	XIII
TABLA 36 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 700°C	XIII
TABLA 37 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 600°C	XIV
TABLA 38 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 600°C	XIV
TABLA 39 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 600°C	XIV
TABLA 40 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 600°C	XV
TABLA 41 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 600°C	XV
TABLA 42 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 600°C	XV

TABLA 43 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 600°C	XVI
TABLA 44 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 600°C	XVI
TABLA 45 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 600°C	XVI
TABLA 46 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 600°C	XVII
TABLA 47 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 600°C	XVII
TABLA 48 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 600°C	XVIII
TABLA 49 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 600°C	XVIII
TABLA 50 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 600°C	XVIII
TABLA 51 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 600°C	XIX
TABLA 52 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 500°C	XIX
TABLA 53 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 500°C	XX
TABLA 54 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 500°C	XX
TABLA 55 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 500°C	XX
TABLA 56 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 500°C	XXI
TABLA 57 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 500°C	XXI
TABLA 58 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 500°C	XXI
TABLA 59 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 500°C	XXII
TABLA 60 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 500°C	XXII
TABLA 61 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 500°C	XXIII
TABLA 62 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 500°C	XXIII
TABLA 63 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 500°C	XXIII
TABLA 64 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 500°C	XXIV
TABLA 65 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 500°C	XXIV
TABLA 66 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 500°C	XXIV
TABLA 67 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 400°C	XXV
TABLA 68 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 400°C	XXV
TABLA 69 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 400°C	XXV
TABLA 70 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 400°C	XXVI
TABLA 71 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 400°C	XXVI
TABLA 72 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 400°C	XXVI
TABLA 73 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 400°C	XXVII
TABLA 74 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 400°C	XXVII
TABLA 75 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 400°C	XXVII
TABLA 76 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 400°C	XXVIII
TABLA 77 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 400°C	XXVIII
TABLA 78 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 400°C	XXVIII
TABLA 79 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 400°C	XXIX
TABLA 80 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 400°C	XXIX
TABLA 81 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 400°C	XXIX
TABLA 82 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 300°C	XXX
TABLA 83 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 300°C	XXX
TABLA 84 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 300°C	XXX
TABLA 85 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 300°C	XXXI
TABLA 86 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 300°C	XXXI
TABLA 87 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 300°C	XXXI
TABLA 88 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 300°C	XXXII
TABLA 89 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 300°C	XXXII
TABLA 90 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 300°C	XXXII

TABLA 91 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 300°C	XXXIII
TABLA 92 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 300°C	XXXIII
TABLA 93 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 300°C	XXXIII
TABLA 94 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 300°C	XXXIV
TABLA 95 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 300°C	XXXIV
TABLA 96 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 300°C	XXXIV
TABLA 97 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 180°C	XXXV
TABLA 98 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 180°C	XXXV
TABLA 99 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 180°C	XXXV
TABLA 100 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 180°C	XXXVI
TABLA 101 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 180°C	XXXVI
TABLA 102 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 180°C	XXXVI
TABLA 103 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 180°C	XXXVII
TABLA 104 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 180°C	XXXVII
TABLA 105 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 180°C	XXXVII
TABLA 106 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 180°C	XXXVIII
TABLA 107 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 180°C	XXXVIII
TABLA 108 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 180°C	XXXVIII
TABLA 109 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 180°C	XXXIX
TABLA 110 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 180°C	XXXIX
TABLA 111 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 180°C	XXXIX
TABLA 112 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 160°C	XL
TABLA 113 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 160°C	XL
TABLA 114 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 160°C	XL
TABLA 115 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 160°C	XLI
TABLA 116 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 160°C	XLI
TABLA 117 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 160°C	XLI
TABLA 118 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 160°C	XLII
TABLA 119 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 160°C	XLII
TABLA 120 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 160°C	XLII
TABLA 121 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 160°C	XLIII
TABLA 122 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 160°C	XLIII
TABLA 123 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 160°C	XLIII
TABLA 124 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 160°C	XLIV
TABLA 125 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 160°C	XLIV
TABLA 126 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 160°C	XLIV
TABLA 127 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 130°C	XLV
TABLA 128 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 130°C	XLV
TABLA 129 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 130°C	XLV
TABLA 130 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 130°C	XLVI
TABLA 131 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 130°C	XLVI
TABLA 132 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 130°C	XLVI
TABLA 133 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 130°C	XLVII
TABLA 134 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 130°C	XLVII
TABLA 135 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 130°C	XLVII
TABLA 136 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 130°C	XLVIII
TABLA 137 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 130°C	XLVIII
TABLA 138 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 130°C	XLVIII

TABLA 139 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 130°C	XLIX
TABLA 140 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 130°C	XLIX
TABLA 141 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 130°C	XLIX
TABLA 142 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 80°C	L
TABLA 143 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 80°C	L
TABLA 144 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 80°C	L
TABLA 145 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 80°C	LI
TABLA 146 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 80°C	LI
TABLA 147 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 80°C	LI
TABLA 148 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 80°C	LII
TABLA 149 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 80°C	LII
TABLA 150 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 80°C	LII
TABLA 151 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 80°C	LIII
TABLA 152 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 80°C	LIII
TABLA 153 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 80°C	LIII
TABLA 154 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 80°C	LIV
TABLA 155 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 80°C	LIV
TABLA 156 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 80°C	LIV
TABLA 157 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL N°1 A 60°C	LV
TABLA 158 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 60°C	LV
TABLA 159 TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°1 A 60°C	LV
TABLA 160 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°2 A 60°C	LVI
TABLA 161 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 60°C	LVI
TABLA 162 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°2 A 60°C	LVI
TABLA 163 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°3 A 60°C	LVII
TABLA 164 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 60°C	LVII
TABLA 165 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°3 A 60°C	LVII
TABLA 166 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°4 A 60°C	LVIII
TABLA 167 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 60°C	LVIII
TABLA 168 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°4 A 60°C	LVIII
TABLA 169 MASA DE INSTRUMENTOS PARA LA PRUEBA N°5 A 60°C	LIX
TABLA 170 TEMPERATURAS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 60°C	LIX
TABLA 171 DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA N°5 A 60°C	LIX

ÍNDICE DE IMÁGENES

IMAGEN 1 ESCORIA LIBERADA AL AMBIENTE PARA ENFRIAMIENTO	9
IMAGEN 2 ESCORIA DE MINERAL	11
IMAGEN 3 ESCORIA APILADA	11
IMAGEN 4 POSICIONAMIENTO BALDES DE ESCORIA	13
IMAGEN 5 AGUA ARROJADA A LOS BALDES POR LAS TUBERIAS	14
IMAGEN 6 FUNDICIÓN CHUQUICAMATA (CODELCO, EN CALAMA) ,2013	15
IMAGEN 7 FUNDICION POTRERILLOS (CODELCO, EN EL SALVADOR), 2018	15
IMAGEN 8 FUNDICIÓN VENTANAS (CODELCO, EN PUCHUNCAVI)	16
IMAGEN 9 FUNDICION CALETONES (CODELCO, EN RANCAGUA)	16
IMAGEN 10 FUNDICIÓN ALTONORTE (XSTRATA, EN ANTOFAGASTA)	17
IMAGEN 11 FUNDICIÓN HERNAN VIDELA LIRA (ENAMI, EN COPIAPÓ)	17
IMAGEN 12 FUNDICIÓN CHAGRES (ANGLO AMERICAN, EN CATEMU)	18
IMAGEN 13 MUESTRA VASO PRECIPITADO	22
IMAGEN 14 MUESTRA EL VASO CON LA BOMBA DE 5W	22
IMAGEN 15 MUESTRA EL VASO CON LA TINTA HOMOGENEIZADA	23
IMAGEN 16 MUESTRA EL TERMÓMETRO UTILIZADO	23
IMAGEN 17 MUESTRA LA MASA DEL BAÑO TÉRMICO CON EL AGUA Y EL TERMÓMETRO	24
IMAGEN 18 PEDESTAL DE HIERRO DEL CRISOL	25
IMAGEN 19 EJECUCIÓN DE PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	26
IMAGEN 20 TOMA DE LECTURA DE TEMPERATURA CON TERMÓMETRO INFRARROJO	27
IMAGEN 21 POSICIONAMIENTO BALDES DE ESCORIA	LXX

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICO 1 COMPORTAMIENTO DEL Cp. vs T SLAG N°1	30
GRÁFICO 2 COMPORTAMIENTO DEL Cp vs T SLAG N°2.....	30
GRÁFICO 3 COMPORTAMIENTO DEL Cp vs T SLAG N°3.....	31
GRÁFICO 4 COMPORTAMIENTO DEL Cp vs T SLAG N°4.....	31
GRÁFICO 5 COMPORTAMIENTO DEL Cp vs T SLAG N°5.....	32
GRÁFICO 6 VARIACIÓN DE Cp. vs T DE TODOS LOS SLAG.....	32
GRÁFICO 7 VALORES DE PARÁMETRO POLINOMIAL AO	35
GRÁFICO 8 VALORES DE PARÁMETRO POLINOMIAL A1	35
GRÁFICO 9 VALORES DE PARÁMETRO POLINOMIAL A2	36
GRÁFICO 10 VALORES DE PARÁMETRO POLINOMIAL A3.....	36
GRÁFICO 11 VALORES DE PARÁMETRO POLINOMIAL A4.....	37
GRÁFICO 13 DATOS EXPERIMENTALES Vs CALCULADOS DE SLAG A 10%	38
GRÁFICO 12 DATOS EXPERIMENTALES Vs CALCULADOS DE SLAG A 5%	38
GRÁFICO 15 DATOS EXPERIMENTALES Vs CALCULADOS DE SLAG A 35%	39
GRÁFICO 14 DATOS EXPERIMENTALES Vs CALCULADOS DE SLAG A 15%	39
GRÁFICO 16 DATOS EXPERIMENTALES Vs CALCULADOS DE SLAG A 50%	39
GRÁFICO 17 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 800°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	IV
GRÁFICO 18 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 800°C- TEMPERATURA VS TIEMPO.....	V
GRÁFICO 19 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 800°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	VI
GRÁFICO 20 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 800°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	VII
GRÁFICO 21 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 800°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	VIII
GRÁFICO 22 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 700°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	IX
GRÁFICO 23 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 700°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	X
GRÁFICO 24 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 700°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XI
GRÁFICO 25 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 700°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XII
GRÁFICO 26 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 700°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XIII
GRÁFICO 27 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 600°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XIV
GRÁFICO 28 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 600°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XVI
GRÁFICO 29 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 600°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XVII
GRÁFICO 30 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 600°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XVIII
GRÁFICO 31 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 600°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XIX
GRÁFICO 32 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 500°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XX
GRÁFICO 33 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 500°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXI
GRÁFICO 34 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 500°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXII
GRÁFICO 35 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 500°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXIII
GRÁFICO 36 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 500°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXIV
GRÁFICO 37 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 400°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXV
GRÁFICO 38 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 400°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXVI
GRÁFICO 39 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 400°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXVII
GRÁFICO 40 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 400°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXVIII

GRÁFICO 41 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 400°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXIX
GRÁFICO 42 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 300°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXX
GRÁFICO 43 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 180°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXXI
GRÁFICO 44 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 300°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXXII
GRÁFICO 45 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 300°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXXIII
GRÁFICO 46 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 300°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXXIV
GRÁFICO 47 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 180°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXXV
GRÁFICO 48 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 180°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXXVI
GRÁFICO 49 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 180°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXXVII
GRÁFICO 50 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 180°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXXVIII
GRÁFICO 51 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 180°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XXXIX
GRÁFICO 52 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 160°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XL
GRÁFICO 53 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 160°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XLI
GRÁFICO 54 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 160°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XLII
GRÁFICO 55 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 160°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XLIII
GRÁFICO 56 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 300°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XLIV
GRÁFICO 57 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 130°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XLV
GRÁFICO 58 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 130°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XLVI
GRÁFICO 59 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 130°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XLVII
GRÁFICO 60 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 130°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XLVIII
GRÁFICO 61 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 130°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	XLIX
GRÁFICO 62 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 80°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	L
GRÁFICO 63 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 80°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	LI
GRÁFICO 64 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 80°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	LII
GRÁFICO 65 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 80°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	LIII
GRÁFICO 66 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 80°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	LIV
GRÁFICO 67 SLAG N°1 AL 5% DE CU A 60°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	LV
GRÁFICO 68 SLAG N°2 AL 10 % DE CU A 60°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	LVI
GRÁFICO 69 SLAG N°3 AL 15 % DE CU A 60°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	LVII
GRÁFICO 70 SLAG N°4 AL 35 % DE CU A 60°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	LVIII
GRÁFICO 71 SLAG N°5 AL 50 % DE CU A 60°C- TEMPERATURA VS TIEMPO	LIX

Capítulo I Introducción

1.1 Presentación del tema

“Las cuatro tesis de este proyecto, de la cual corresponde a la parte relacionada a Estudio Termodinámico de Granalla de Escoria a diferentes concentraciones de Cobre, rango de alta y baja temperatura aludiendo a las partes 2 y 3 del proyecto, están basadas en la propuesta de proceso de recuperación de energía desde escoria fundida presentado por el Ph.D. Sergio Rivera Olivares el año 2008 en SKM (Sinclair Knight Merzt) empresa de ingeniería australiana, la que le otorgó el premio australiano Jhon Winston Prize, sin embargo, no continuó proyecto porque no estaba dentro de su ámbito de acción; y luego, en el año 2011, presentado a las autoridades de Codelco, División “El Salvador”, en donde fue analizada y jamás continuada como proyecto”.

Actualmente nuestro país es el mayor productor de cobre del mundo, convirtiéndolo en un interés nacional e internacional debido a que el cobre que se extrae proviene de depósitos de cobre pórfido, este tipo de depósito son los más relevantes dentro los depósitos de cobre, los cuales se encuentran principalmente en América del sur.

Para el proceso de la obtención del cobre se debe disponer de una gran cantidad de energía. A medida que transcurre el tiempo el uso de la energía eléctrica cada vez es mayor, debido principalmente a su eficiencia para la gestión de las diferentes instalaciones de procesamiento del mineral, por el efecto de la evolución del tamaño de la maquinaria para las operaciones del rubro y las instalaciones debido a la caída de la ley de cobre en los minerales.

Sin dejar de mencionar los antecedentes que ha sufrido Chile en los últimos años que considera una grave escasez de suministro de energía, acontecimientos tales como en el 2004 las restricciones en los envíos de energía desde Argentina , presentando una marca importante en mayo de ese año, cuando un 47% de la demanda chilena no pudo ser

cubierta, continuando en 2007 y principios de 2008 cuando Chile enfrentó una sequía que afectó a gran parte del territorio nacional, sumado a ello el grave terremoto del 2010 que produjeron cortes de energía eléctrica en varios puntos del país ^[6]. Es por ello que se debe enfatizar que sin la energía no es posible avanzar en la minería, resaltando que estamos en una era en la que la tecnología e innovación están gobernando al sector minero donde la energía es un tema país.

La energía tiene gran demanda, ha quedado claro. Pero la gran paradoja es que las fundiciones botan energía al medio ambiente en forma de calor cuando las escorias fundidas son arrojadas al suelo, a la tierra, para que se enfríen de 1200 grados Celsius hasta que quedan a temperatura ambiente. Y la cuestión es ¿Por qué no se recupera ese calor y se convierte en energía eléctrica? El problema es que, debido a un tema de materiales, no es posible utilizar un intercambiador de calor para recuperar energía de un líquido a 1200 °C. Esta es la razón por la cual nunca se ha intentado.

Las escorias son elementos comunes en la actividad minera. Esta mezcla de óxidos en estado líquido debido a que se extraen del proceso a una temperatura que supera los 600 °C que posteriormente es llevada a los botaderos para su eliminación y enfriamiento a temperatura ambiente. Como se sabe la gran energía que se pierde en esta acción podría significar la solución a los problemas energéticos que está provocando las alzas en los costos de producción energética en el sector minero, es por ello que el proceso de recuperación de energía de las fundiciones se hace una necesidad para poder encontrar una solución al gasto energético minero.

En 2008 el Ph.D. Sergio Rivera, entonces Ingeniero de Procesos de la empresa Sinclair Knight Merz (SKM) empresa internacional australiana de Ingeniería presentó por primera vez la posibilidad de recuperar la energía de escoria fundida y propuso cómo convertir en energía eléctrica el calor de las escorias. La empresa entregó fondos para que un equipo

multidisciplinario evaluara el proyecto. El resultado fue que, desde el punto de vista mecánico, termodinámico, eléctrico, y sustentable era completamente posible hacerlo. Sin embargo, la empresa decidió que la finalidad no estaba dentro de su ámbito laboral y cerraron el tema.

La solución que se sugirió fue pasar de escoria líquida a 1200 °C a granalla de escoria a 800 °C y luego usar intercambiadores de calor para producir vapor y por medio de un ciclo de vapor, convertir el calor en energía eléctrica.

En el año 2012, Trabajando como ingeniero de procesos para Codelco, en división el Salvador, Sergio Rivera presentó a la gerencia esta propuesta. La propuesta fue recibida, analizada y guardada. No la desarrollaron.

Así es como ahora, trabajando como investigador docente en UNAB, se ha podido generar un proyecto en el que se desarrollan las bases para poder hacer realidad la propuesta de recuperación de energía desde el calor de las escorias fundidas.

En china hay un investigador Quingbo Qu ^[1], quien en octubre de 2015 publicó un artículo en donde se repite la sugerencia planteada en el año 2008 por Sergio Rivera, sin embargo, no plantean el proceso completo hasta la recuperación como energía eléctrica. Al lado de esto, en Julio 2017, un grupo de estudiantes de la Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso ^[2], sugieren recuperar energía desde escoria líquida, pero no mencionan más que la intención de querer hacerlo. Es posible que luego de presentar en tantas partes esta sugerencia, les llegó a ellos por medio de conversaciones. Es muy bueno que otras personas, otros investigadores estén viendo esto como una solución técnica posible, después de ser sugerida hace más de 10 años por el supervisor de esta tesis, porque esto aumenta la posibilidad que algún día se haga realidad.

Hasta ahora no se ha podido evaluar ni siquiera teóricamente la eficiencia de esta posibilidad, porque no hay existencia de información termodinámica relacionada a la escoria, y esta es la razón de este proyecto de cuatro tesis.

El proyecto se desarrolla en cuatro tesis diferentes, pero con un eje común, lograr plantear las bases para que esta propuesta se haga realidad.

Parte 1: Tesis de Diseño de Generador de Granallas desde Escoria fundida

Parte 2: Tesis de Estudio Termodinámico de Granalla de Escoria a diferentes concentraciones de Cobre, rango de alta temperatura (800 hasta 25 °C).

Parte 3: Tesis de Evaluación, Diseño y Cálculo de proceso de recuperación de energía desde escorias fundidas.

1.2. Discusión bibliográfica

Este método de obtención de calor tiene varias desventajas: la capacidad de procesamiento y eficiencia son bajos y el proceso no se puede adaptar a producción continua. A partir de 1980, Nippon Steel, NKK, Kawasaki Steel, Kobe Steel, Sumitomo Metal Industrias y Nisshin Steel se dedican a la investigación de granulación de aire, y se llevaron a cabo experimentos durante seis años en los hornos a grandes temperaturas de Nippon Steel. Durante la granulación de aire, se consume mucha energía.

En 1986, Ucrania explotado un nuevo método para la recuperación de calor basado en la tecnología de colada continua y laminado. Sin embargo, el método exhibió un defecto grave: la conductividad térmica baja y débil permeabilidad al aire no eran adecuados para el intercambio de calor entre la escoria y el aire.

Debido a la alta productividad y diámetro de las partículas de escoria controlable ofrecida por el proceso, la atomización taza giratoria se ha estudiado ampliamente, sin embargo, se usa aire como el medio para recuperar energía térmica de escoria y el aire caliente se usa para precalentar el aire de combustión o para producir energía eléctrica.

Un aumento en el número de Reynolds (Re) no mostró ningún efecto sobre la transferencia de coeficiente de calor o eficiencia en la recuperación. Sin embargo, la transferencia de coeficiente calor y eficiencia de la recuperación aumenta con una disminución en el diámetro de partícula y un aumento en la velocidad de las partículas descendentes. Junxiang Liu, Yu Qingbo •, Jiayan Peng, Xianzhong Hu, Duan Wenjun ^[1][7]

La especificación del calor de aire es baja, y debe ser una gran cantidad de aire para enfriar la escoria fundida a alta temperatura, lo que indica un alto consumo de energía.

1.3. Contribución del trabajo y su importancia

Este trabajo de investigación se basa principalmente en la obtención de energía térmica de las escorias de granalla de cobre. Las escorias de fundición constituyen uno de los principales desechos sólidos en las plantas de la industria del cobre, lo cual aumenta día a día.

Esto genera la necesidad de poder encontrar usos alternativos a la escoria, de modo de reutilizar y dar un valor agregado a lo que se genera como subproducto de las fundiciones de cobre. Debido a lo anterior, la propuesta del proyecto de obtención de calor es ambiciosa y puede causar un vuelco en cuanto a la utilización que se les da a estos desechos provocando un impacto a nivel internacional.

En los últimos 7 años el consumo de electricidad creció un 24%, de la mano del aumento del mineral procesado para mantener la producción de cobre fino ^[3], lo cual es un porcentaje altísimo a nivel país lo que hace atractivo el poder convertir esta energía y contribuir no tan solo en aspectos económicos, que por lo demás serían cuantiosos tanto en minería como en diferentes rubros, sino también en aspectos medio ambientales.

El impacto social positivo que provocaría esta investigación es de mucha importancia y tienen una vista creciente hacia el futuro. La energía eléctrica es un insumo estratégico para la minería del cobre, por el uso intensivo que se requiere en sus diversos procesos productivos y servicios como por la incidencia en los costos de operación.

La escoria muchas veces es considerada desecho o residuos de uso muy limitados, por lo que se le dará un uso con un fin que beneficiará a la comunidad en general, los resultados de esta investigación son aplicables en los distintos entornos tanto empresariales como académicos debido a la necesidad de colaboración. El alcance de esta investigación no se limita a nivel nacional, sino que puede difundirse a nivel internacional conforme avance la tecnología y la aplicabilidad de la misma.

1.4. Objetivo general

De los procesos de fundición se genera una gran cantidad de escoria líquida a grandes temperaturas, desperdiciando esa energía que se escapa al ambiente sin poder reutilizarse en otros procesos.

El objetivo general de este trabajo de título obtener los datos experimentales y el tratamiento numérico de los datos experimentales, y un modelo para el cálculo de escorias de fundición de cobre para varios porcentajes de cobre y temperaturas entre 800 °C y 60 °C.

1.4.1. Objetivos específicos

Objetivos experimentales

1. Construcción de un baño térmico (Calorímetro).
2. Realizar prueba de aislación en el baño térmico (Calorímetro).
3. Realizar pruebas con la bomba para la recirculación y homogeneidad del sistema.
4. Realizar mediciones de pérdidas de temperatura del agua.

Objetivos del diseño

1. Elaboración de curvas de temperatura en cada una de las etapas del proceso.
2. Descripción y comparación entre las distintas granallas de escoria de cobre utilizadas para su respectiva recuperación energética.

1.5. Estado del Arte / alcance

Las investigaciones realizadas anteriormente nos dan un pie en nuestra investigación de modo que nos aportan información con un grado de confiabilidad, ya que sus estudios son realizados con herramientas de mayor asertividad, considerando mayores recursos en sus investigaciones.

Es por esto que se obtuvo información de una publicación realizada por la escuela de Materiales y Metalurgia, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, República Popular China. En donde exponen la obtención de calor de la granalla de escoria de cobre y se pudo obtener el C_p del agua, sin embargo, sus estudios se basaron en las pérdidas de temperatura de los tubos de caldera.

En un comienzo de la investigación fue necesario crear un baño térmico (Calorímetro), en donde se solicitó por el docente que éste fuera lo más aislado posible, de modo que las pérdidas fueran mínimas. Para eso es necesario ser cauteloso en todas las mediciones y corroborar la información, ya que estos procedimientos de investigación necesitan tener la mayor cantidad de certidumbre al respecto.

Para este proyecto se realizarán estudios con distintas concentraciones de granalla de escorias las cuales son 5, 10, 15, 35 y 50 % de cobre., en donde se realizarán las comparaciones adecuadas de modo de obtener la mayor recuperación térmica. Las temperaturas estudiadas son 60, 130, 160, 180, 300, 400, 500, 600, 700 y 800 °C. La cantidad de masa de cada uno de los experimentos es de 12 gramos para alta temperatura y 82.7 para baja temperatura. Se ejecutaron 55 experimentos en todo este proceso. Lo anterior es posible, ya que se sabrá de antemano el valor de la masa de cada una de ellas y la única incógnita será el C_p del agua, que es obtenido a través de la fórmula mencionada en el capítulo 2.5 de capacidad calorífica. Finalmente cabe destacar que es un análisis extenso y que el trabajo no tan solo queda en esta investigación, sino que sirve para posteriores estudios.

Capítulo II Marco Teórico

2.1 Escoria

La escoria de las fundiciones es considerada los residuos, material de desecho o subproductos generados de los procesos pirometalúrgicos. Es una sustancia vítrea proveniente de los metales que se funden, la cual se une a los fundentes y a otros elementos ^[17]. Por consiguiente, la escoria es un subproducto procedente del proceso de fundición de los metales.

Las escorias contienen muchos componentes de los cuales pueden ser óxidos metálicos, sulfuros de metal entre otros. Los procesos de fundición eliminan las escorias principalmente para eliminar determinados residuos, aunque también contribuyen a mantener estable la temperatura y a reducir la re-oxidación del metal final. Por lo general la escoria siempre se descarta y se enfría al ambiente y a veces una vez fría, se utiliza para arenado, como mortero de ciertos concretos, fortalecer muros, en la pavimentación, etc.)



Imagen 1 Escoria liberada al ambiente para enfriamiento

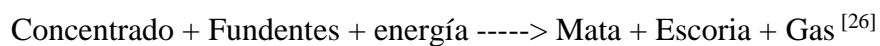
Fuente: Elaboración de Sergio Rivera 2015

2.2 Origen de la escoria

Para la obtención, refinación y producción del cobre, dependerá de que el mineral extraído sea sulfuro o que sean óxidos, debido que cada uno posee un tratamiento diferente para su producción. En caso de que el mineral sea sulfuro de cobre se utiliza la pirometalurgia y en caso de que el mineral sea óxido de cobre se utiliza el método hidrometalúrgico.

La pirometalúrgica es la rama de la metalurgia que se encarga de la obtención y purificación de los metales a través de la utilización de altas temperaturas. En la que el mineral de cobre se tritura, se muele (etapa de reducción de tamaño) y se concentra a aproximadamente el 30%. Luego, el concentrado de cobre se funde, se convierte, se refina al fuego y se convierte en ánodos de cobre para alcanzar una pureza de 99.5%. Finalmente, para alcanzar una pureza del 99,99%, los ánodos de cobre se electro refinan para producir un cátodo de cobre, que se vende al mercado ^[6].

La escoria de cobre es un material de desecho del proceso de pirometalurgia más conocido como producción por fundición. En esta etapa hay dos componentes principales, la reacción de producción de mata y escoria la que podemos representarla por:



Dónde: Mata: Cu₂, FeS,

Escoria: FeO, Fe₃O₄, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Cu₂O, otros

Gas: O₂, SO₂, N₂, CO₂, H₂, H₂O, otros.

Debido a las altas temperaturas en el horno, el sulfuro de cobre y hierro



El óxido férrico es reducido a óxido ferroso por el sulfuro de hierro.



El óxido ferroso combinado con la sílice forma la escoria.



La mata pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre, logrando que tengan un porcentaje menor al 1% de cobre antes de ser descartadas ^[25].



Imagen 2 Escoria de mineral

Fuente: Elaboración de Sergio Rivera 2015



Imagen 3 Escoria apilada

Fuente: Elaboración de Sergio Rivera 2015

2.3 Características de la escoria

En Chile se observan que algunas de las propiedades de las escorias de cobre común están dadas por las siguientes características:

Tabla 1 Propiedades físicas y mecánicas de la escoria de cobre

Propiedades Físicas y mecánicas de escoria de cobre típica	
Propiedades	
Apariencia	Negro, Vitreo, mas vesicular cuando granulado
Unidad de peso	2800-3800(Kg/m ³)
Absorción	0.13%
Densidad Aparente	144-162 libras por pie cubico
Conductividad	500 μ s/cm
Gravedad específica	2.8-3.8
Dureza	6-7 Moh
Humedad	<5%
Cloruro Soluble en agua	<50ppm
Perdida por Abrasion	24.10%
Sulfato de sodio	0.90%
Perdida de solidez	-
Angulo de fricción interna	40-53

Fuente: physicochemical characterization of copper slag ^[8]

Es importante mencionar que la escoria una vez en temperatura ambiente toma un color oscurecido o negro con una apariencia vítrea. La gravedad específica varía con el contenido de hierro, de 2.8 a 3.8. El peso unitario de la escoria de cobre es algo más alto que el del agregado convencional. La capacidad de absorción del material es típicamente muy baja. La escoria de cobre granulada es más porosa y, por lo tanto, tiene menor gravedad específica y mayor capacidad de absorción que la escoria de cobre enfriada por aire. La escoria de cobre granulada se compone de partículas angulares de forma regular, en su mayoría entre 4,75 y 0,075 mm³. ^{[8] [12]}

Por otro lado, está el enfriamiento de la escoria de cobre en baldes, en donde estos se ubican en hileras de 15 por un lado y 15 por el otro llamado comúnmente como parrones, de las cuales son 60 aproximadamente. Cada balde posee una altura de 4 metros aproximadamente y cada uno tiene su propia tubería a una altura de 1,5 metros aprox. con salida de agua que está adherida a una estructura metálica como se puede apreciar en la siguiente imagen.



Imagen 4 Posicionamiento baldes de escoria

Fuente: Elaboración de Sergio Rivera 2015

Cada lugar donde se encuentra el balde y su respectiva tubería poseen su propio número de identificación en donde posteriormente al depositar la escoria en los baldes se riega con agua de tal manera que tenga un flujo continuo. El balde se quedará allí al menos unos tres días antes que lo retiren para luego voltearlo y se obtenga el molde en estado sólido del balde.



Imagen 5 Agua arrojada a los baldes por las tuberías
Fuente: Elaboración de Sergio Rivera 2015

En el proceso de enfriado, la escoria líquida que sale de la fundición con concentración de cobre de 1,5 a 4,5 %, al estar líquida y sin movimiento lo que permite la separación del cobre, el cual por poseer una mayor densidad que el Hierro este se va hacia abajo, de manera que cuando ya está frío, la concentración de cobre abajo es mucho más que arriba, pudiendo lograr concentraciones hasta de 50% en el fondo.

2.4 Fundiciones en Chile

Chile tiene siete fundiciones que tratan con concentrados de cobre, procesos pirometalúrgicos. Las cuales actualmente las siete fundiciones de cobre, cinco son estatales y dos privadas sin dejar de mencionar que cuatro pertenecen a Codelco

1_ Fundición Chuquicamata (CODELCO, en Calama)



Imagen 6 Fundición Chuquicamata (CODELCO, en Calama) ,2013

Fuente: [image] Available at: www.mch.cl/minera-chilena ^[17]

2_ Fundiciones Potrerillos (CODELCO, en El Salvador)



Imagen 7 Fundición Potrerillos (CODELCO, en El Salvador), 2018

Fuente: [image] Available at: www.mch.cl/minera-chilena ^[18]

3_Fundición Ventanas (CODELCO, en Puchuncaví)



Imagen 8 Fundición Ventanas (CODELCO, en Puchuncaví)

Fuente: [image] Available at: www.nueva minería.com ^[19]

4_Fundicion Caletones (CODELCO, en Rancagua)



Imagen 9 Fundición Caletones (CODELCO, en Rancagua)

Fuente: [image] Available at: www.flickr.com ^[20]

5_ Fundición Altonorte (Xstrata, en Antofagasta)



Imagen 10 Fundición Altonorte (Xstrata, en Antofagasta)

Fuente: [image] Available at: www.mch.cl/minera_chilena ^[21]

6_ Fundición Hernan Videla Lira (Enami, en Copiapó)



Imagen 11 Fundición Hernan Videla Lira (Enami, en Copiapó)

Fuente: [image] Available at: www.enami.cl ^[22]

7_ Fundición Chagres (Anglo American, en Catemu)



Imagen 12 Fundición Chagres (Anglo American, en Catemu)

Fuente: [image] Available at: <https://chile.angloamerican.com> ^[23]

Tabla 3 Capacidad de tratamiento de las fundiciones de Chile

Fundición	Capacidad de tratamiento
Chuquicamata (Codelco)	Capacidad nominal para fundir 1,65 Mta Nivel actual de fusión: 1,3 Mta
Potrerillos (Codelco)	Diseñada para fundir 710 Kta. Nivel actual de fusión: 600 Kta
Ventanas (Codelco)	Diseñada para fundir 420 Kta. Nivel actual de fusión: 400 Kta
Caletones (Codelco)	Diseñada para fundir 1,43 Mta. Nivel actual de fusión: 1,36 Mta
Paipote (Enami)	350.000 toneladas anuales (nominal)
Altonorte (Glencore)	De acuerdo con el presupuesto vigente, las cifras productivas para 2016 alcanzan a 1.000.000 toneladas de concentrado seco fundido, 1.000.000 ton de ácido y cerca de 300.000 ton de ánodos. Por una mantención general programada, las cifras son menores a la capacidad nominal
Chagres (Anglo American)	Durante 2014 se produjeron 129.000 toneladas de ánodos de cobre y 476.000 ton de ácido sulfúrico como subproducto del proceso, a partir de la fusión de 619.000 ton de concentrados

Fuente www.mch.cl, Agosto 2015 ^[24]

2.5 Capacidad calorífica específica

El calorímetro está construido de tal forma que impide la conducción de calor a través de él. En la mayoría de los casos suele tener dobles paredes entre las que se ha hecho el vacío o lleva un material aislante térmico, que impide o minimiza la conducción de calor, y por ello conserva muy bien la temperatura de los cuerpos que se encuentran dentro. Tomando esta consideración la elaboración del calorímetro fue considerando el mayor aislamiento posible, su constitución está a base de material aislante para lograr el óptimo en los resultados obtenidos.

Con este instrumento se logró medir la cantidad de calor que es recibida por el H_2O y suministrada por la granalla de escoria. Esto implica que, con este equipo fabricado, es capaz determinar el calor específico de la especie de estudio, en este caso granalla de escoria. Esta condición se denomina entalpía, el cual es un parámetro termodinámico

Las transferencias de calor se ejecutan a través de variaciones de temperatura. Previo a toda experiencia es necesario calibrarlo, esto es, determinar su capacidad calorífica. Para realizar el calibrado, se mezclan cierta cantidad de agua fría con agua caliente y se mide la temperatura de equilibrio.

Como se desea obtener el valor de C_p de la Granalla de escoria de cobre, considerando que los estudios se desarrollaran tanto a altas y bajas temperaturas, se debe considerar el hecho que el calor circule de forma homogénea en su interior, es por ello que se incorporó una bomba la cual cumplía con la única función de recircular el fluido para que la transferencia de energía térmica abarcara sin problemas el contenido.

Con todo lo anterior la fórmula para obtener el Cp. queda expresada:

$$M_{(Agua)} \times C_{p(Agua)} \times \Delta T_{(Agua)} + \Delta H_{vap} - G_{cal} = M_{(Granalla)} \times C_{p(Granalla)} \times \Delta T_{(T_I - T_F)}$$

Formula 1 Capacidad calorífica específica

Donde:

M = Masa

C_p = Calor específico

ΔT = Temperatura

ΔH = Calor de evaporación

G_{cal} = Calor de la bomba

La cantidad de calor Q que se transfiere desde la granalla y la que absorbe el H_2O , responde a la expresión

$$Q_{Absorbido} = Q_{cedido}$$

Despejando la ecuación, para obtener la incógnita la formula se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{M_{(Agua)} \times C_{p(Agua)} \times \Delta T_{(Agua)} + \Delta H_{vap} - G_{cal}}{M_{(Granalla)} \times \Delta T_{(T_I - T_F)}} = C_{p(Granalla)}$$

Capítulo III Metodología

En este capítulo se explicará la metodología de cómo se han alcanzado los objetivos de la presente tesis. La metodología que se ejecutó en este trabajo se basó en la división de 3 partes, diseño de prototipos, experimental, análisis de resultados para la obtención de modelación matemática. La metodología de diseño de prototipo permitió evaluar las condiciones de trabajo y enfatizar los posibles problemas en la etapa experimental y así poder adjudicar las mejores condiciones al prototipo del calorímetro y del procedimiento en sí.

Posteriormente en la metodología experimental se enfatizó en implementar el método de trabajo para obtener resultados consistentes bajo variables de entorno.

Finalmente, en la modelación matemática los valores obtenidos en la parte experimental se realizaron el diseño conceptual, donde se buscó poder llevar este proceso a un modelo que permitiera obtener el cálculo de escorias a diferentes concentraciones de Cu.

3.1 Metodología experimental

3.1.1 Calibración y homogeneidad del calorímetro

En primer lugar, luego de la creación del baño térmico, se procedió a calibrarlo con el fin de determinar la aislación y que posea los requerimientos necesarios para realizar la investigación considerando que las temperaturas de trabajo varían de 50 a 1000 °C. Se utilizó un vaso precipitado de 2000 ml en donde se depositó agua tibia y a temperatura ambiente. Posteriormente se introdujo una bomba de 5W para comprobar que al momento de incorporar la granalla ésta tuviera un escenario homogéneo y no presentara pérdidas de calor inestables



Imagen 13 Muestra vaso precipitado

Fuente: Elaboración propia obtenida del laboratorio experimental, 2018



Imagen 14 muestra el vaso con la bomba de 5W

Fuente: Elaboración propia obtenida del laboratorio experimental, 2018



Imagen 15 muestra el vaso con la tinta homogeneizada
Fuente: elaboración propia obtenida del laboratorio experimental, 2018

Lo que se obtuvo una homogenización adecuada, ya que se formaron remolinos en el vaso transportando partículas de Aislapol por toda la superficie y partículas dentro del vaso de arriba hacia abajo en forma helicoidal. Finalmente se incorporó tinta de color azul y en aproximadamente 5 segundos se homogenizó toda la tinta.

Posterior a la calibración se determinó especificar cuanto calor pierde el baño térmico al estar el agua a temperatura ambiente, para esto se compró un termómetro que pudiera arrojar las temperaturas con las cuales se utilizaron en la investigación y se dispuso en la superficie del baño térmico.



Imagen 16 muestra el termómetro utilizado
Fuente: Elaboración propia obtenida del laboratorio experimental, 2018

Luego, éste nos arrojó una temperatura de 34,4 °C en donde corresponde a $\frac{3}{4}$ de agua helada a 10,9 y $\frac{1}{4}$ de agua tibia 65°C obtenida de un hervidor, en donde la variación de la temperatura al mantener el vaso con el agua aislados fue mínima, considerando que se dejó por 24 horas y bajó tan solo 1°C, por lo que se concluye que el baño térmico posee una buena aislación y quedó listo para los análisis posteriores.



Imagen 17 Muestra la masa del baño térmico con el agua y el termómetro

Fuente: Elaboración propia obtenida del laboratorio experimental, 2018

3.1.2 Procedimiento experimental

En el procedimiento experimental se realiza básicamente un esquema detallado del proceso que se ha seguido a lo largo del proyecto.

En primer lugar, se determinó la ubicación estratégica de los materiales en el laboratorio, de tal manera que se utilizaran los espacios para cada una de las funciones a realizar, tomando en consideración una distancia de seguridad, con el balón de gas y los demás implementos que se encuentran en el laboratorio.

El proceso consta de tres estaciones de trabajo que se definen a continuación:

1. Sector de quemado: Se realiza el proceso de quemado.
2. Sector de pesaje: Se determina la masa de los implementos.
3. Sector de análisis de datos: Se traspasa la información obtenida al software.

Al comienzo en el sector de quemado se procede a encender el soplete adherido al balón de gas, realizando estas maniobras entre dos ayudantes, uno se encarga de abrir la llave de paso del gas a una distancia apropiada, mientras que el otro abre la llave de paso del soplete y procede a encenderlo con un chispero, para luego acercar la llama al crisol donde se encuentra la muestra con la que se realizará la prueba.



Imagen 18 Pedestal de hierro del crisol

Fuente: Elaboración propia obtenida del laboratorio experimental, 2018

El tiempo de quemado dependerá de la prueba que se requiera en el momento, es decir, para una muestra de 800 °C se requiere más tiempo que para una de 200°C debido al tiempo necesario requerido para alcanzar dichas temperaturas. Para obtener la información del cambio de temperatura que va registrando la granalla de escoria de cobre a medida que transcurre el tiempo se obtiene a través de un termómetro infrarrojo capaz de digitalizar temperaturas superiores a 1000 °C.

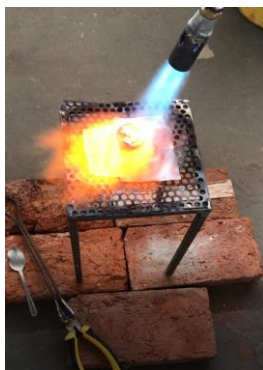


Imagen 19 Ejecución de procedimiento experimental

Fuente: Elaboración propia obtenida del laboratorio experimental, 2018

Mientras se realiza el quemado las otras dos personas que conforman el equipo preparan el sector de pesaje y toma de datos, en donde se calibran las balanzas para obtener un adecuado pesaje de los objetos. En primera instancia se masan los implementos que se utilizarán posteriormente, que corresponden a los siguientes: calorímetro, vaso precipitado 2000 ml, termómetro digital pequeño, bomba, agua, granalla requerida para el experimento y todos los implementos montados en el calorímetro. Para luego digitar cada masa en el sector de toma de datos, donde se ordenarán con una masa pre y post quemado.

Luego de montar los implementos en el calorímetro estos se desplazan a la zona de quemado en donde se ubica a una distancia de seguridad, ya que, se sigue quemando y la

distancia tampoco debe ser muy lejos debido a que posteriormente se debe vaciar el crisol por la entrada superficial del calorímetro con la muestra de granalla.

Seguidamente se enciende el termómetro en grados Celsius, ubicado en la superficie del calorímetro y se conecta la bomba en la extensión de manera de asegurarse que la solución de agua sea homogénea y posea la misma temperatura en cualquier punto del vaso precipitado.



Imagen 20 Toma de lectura de temperatura con termómetro infrarrojo

Fuente: Elaboración propia obtenida del laboratorio experimental, 2018

Por consiguiente, una vez alcanzada la temperatura con la que se desea trabajar la granalla de escoria de Cu se procede a cerrar la llave de paso del balón de gas y asimismo la del soplete ubicándolo en una zona segura, mientras que otro colaborador digitaliza la temperatura, otro procede a sujetar el crisol con las pinzas diseñadas para vaciar el contenido de este en el calorímetro, así mismo el cuarto colaborador se encarga de obtener un video desde el momento en que se vacía el crisol en el baño térmico de tal manera que registre la temperatura inicial del proceso hasta cuando comienza a bajar la temperatura, la cual corresponde a un minuto aproximadamente.

Inmediatamente después de registrar el video se desenchufa la bomba y se deja el calorímetro en la zona de pesaje, en donde, se realiza exactamente el mismo

procedimiento de masar cada uno de los implementos por separado y todos juntos pero esta vez con la granalla en el interior del vaso precipitado.

Luego de masar todos los objetos se limpian con rigurosidad para una nueva toma de muestras y se digitan los datos obtenidos considerando el video realizado y así se obtenga el calor específico (C_p) de la muestra de granalla trabajada a través de Excel, a través de la ecuación presentada anteriormente. Finalmente, este proceso se realizó más de 55 ocasiones para diferentes temperaturas y porcentajes de Cu, obteniendo el C_p de cada una de ellas.

Capítulo III Resultados experimentales y análisis

A continuación, se muestra en las tablas de datos experimentales de los Slag a diferentes concentraciones de cobre.

Tabla 4 Cp. correspondiente a cada Slag

Slag n°1 al 5%	T(°C)	Cp. (cal/g °C)	Slag n°2 al 10%	T(°C)	Cp. (cal/g °C)	Slag n°3 al 15%	T(°C)	Cp. (cal/g °C)
	800	0.44074		800	0.38710		800	0.32628
	700	0.35876		700	0.37780		700	0.45361
	600	0.41305		600	0.34914		600	0.37027
	500	0.40738		500	0.38165		500	0.35570
	400	0.42027		400	0.38545		400	0.40995
	300	0.41387		300	0.46032		300	0.43390
	180	0.20568		180	0.21684		180	0.24143
	160	0.20125		160	0.20194		160	0.21686
	130	0.23775		130	0.19462		130	0.19462
	180	0.20568		180	0.21684		80	0.27435
	60	0.27262		60	0.25359		60	0.22422

Slag n°4 al 35%	T(°C)	Cp. (cal/g °C)	Slag n°5 al 50%	T(°C)	Cp. (cal/g °C)
	800	0.21876		800	0.23397
	700	0.47193		700	0.35988
	600	0.29735		600	0.35089
	500	0.40234		500	0.30363
	400	0.27457		400	0.25627
	300	0.32614		300	0.32684
	180	0.19527		180	0.20763
	160	0.19255		160	0.19394
	130	0.23068		130	0.19985
	80	0.28008		80	0.28008
	60	0.22836		60	0.22925

Como se ha menciona el trabajo experimental se incluyeron cinco muestras de escorias de fundición de cobre, todas ellas con un contenido de partículas pequeñas y de granulometría similar. La concentración de cobre correspondiente son 5, 10, 15, 35 y 50% de cobre. Las

temperaturas son 60, 80, 130, 180, 300, 400, 500, 600, 700 y 800 ° C. La cantidad de masa de cada uno de los experimentos es de 12 gramos, entregando datos experimentales mostrados en las tablas anteriores.

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a los slag de los datos experimentales de las tablas número Tabla n°3

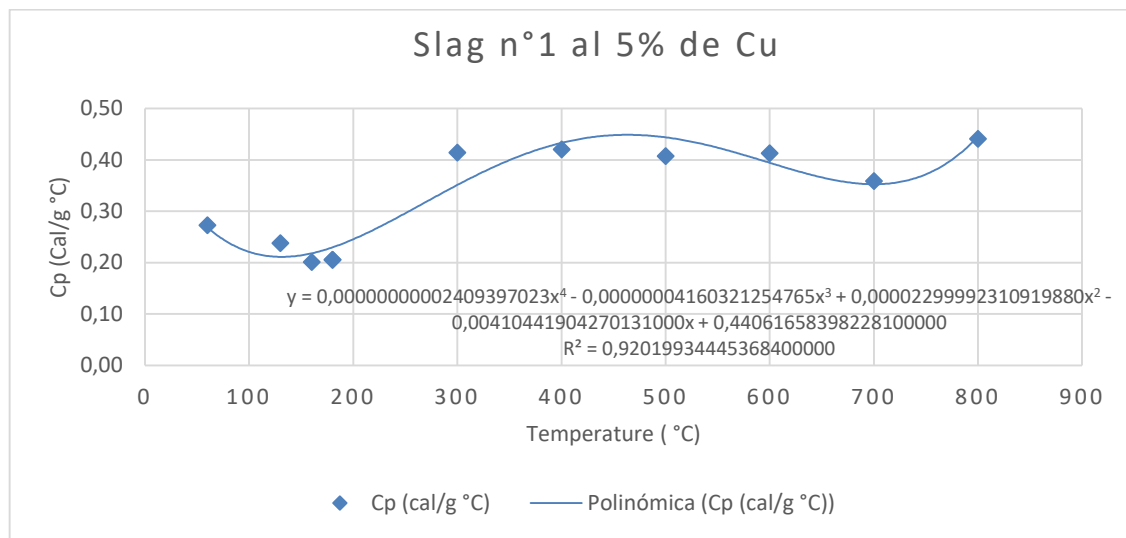


Gráfico 1 Comportamiento del Cp. vs T Slag n°1

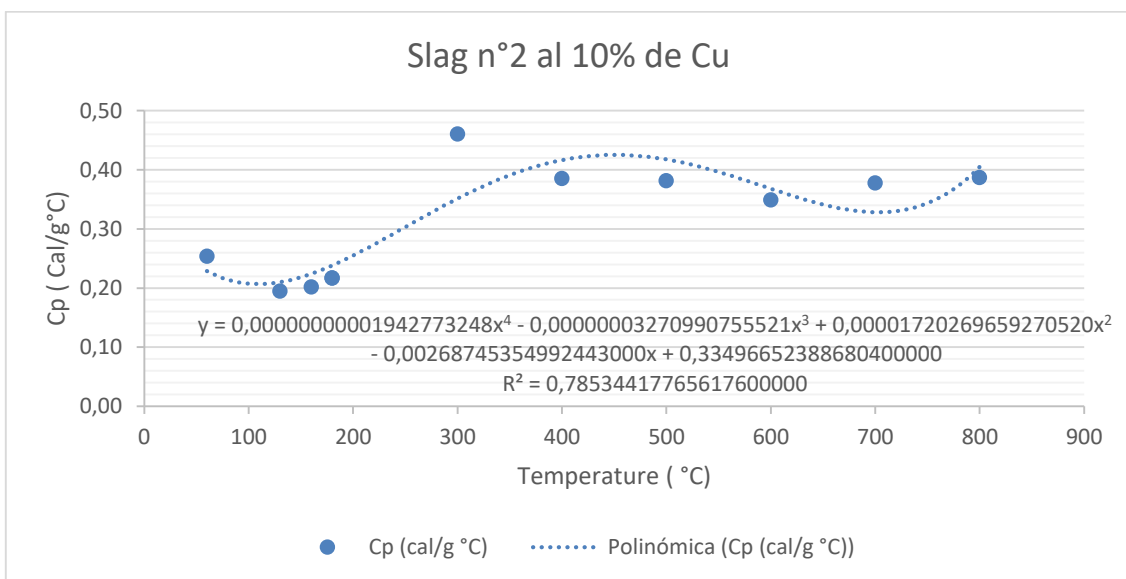


Gráfico 2 Comportamiento del Cp. vs T Slag n°2

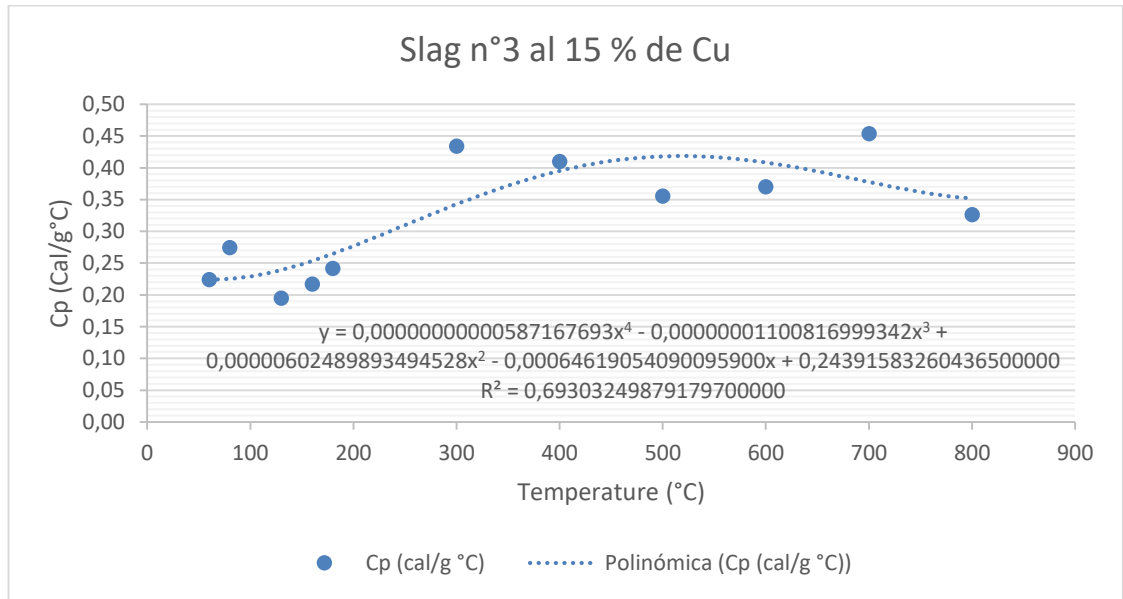


Gráfico 3 Comportamiento del Cp. vs T Slag n°3

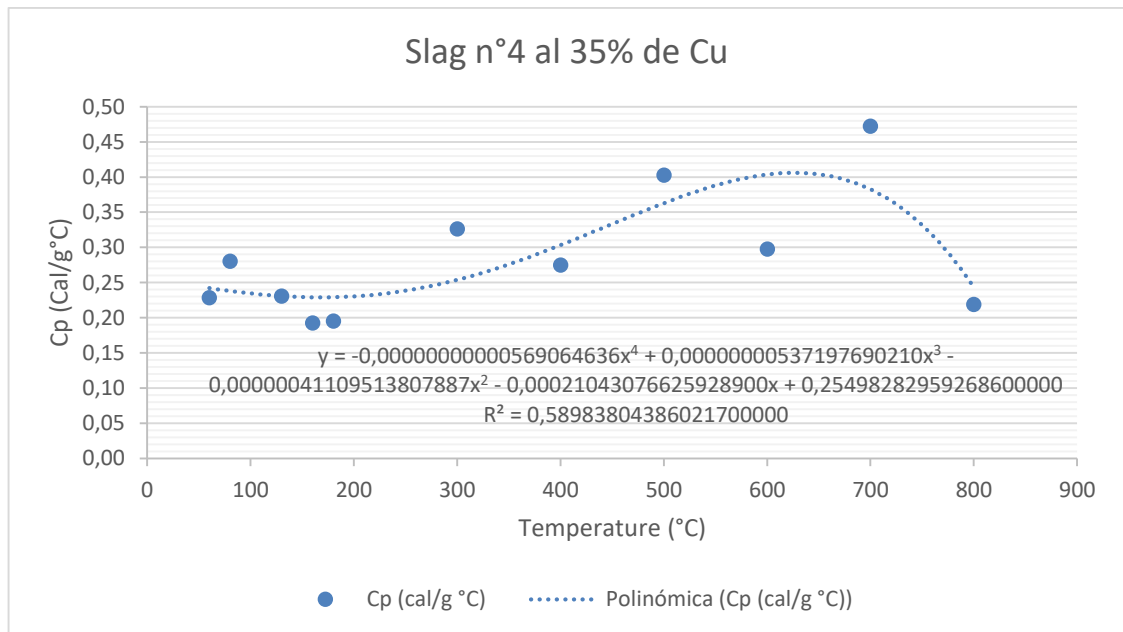


Gráfico 4 Comportamiento del Cp. vs T Slag n°4

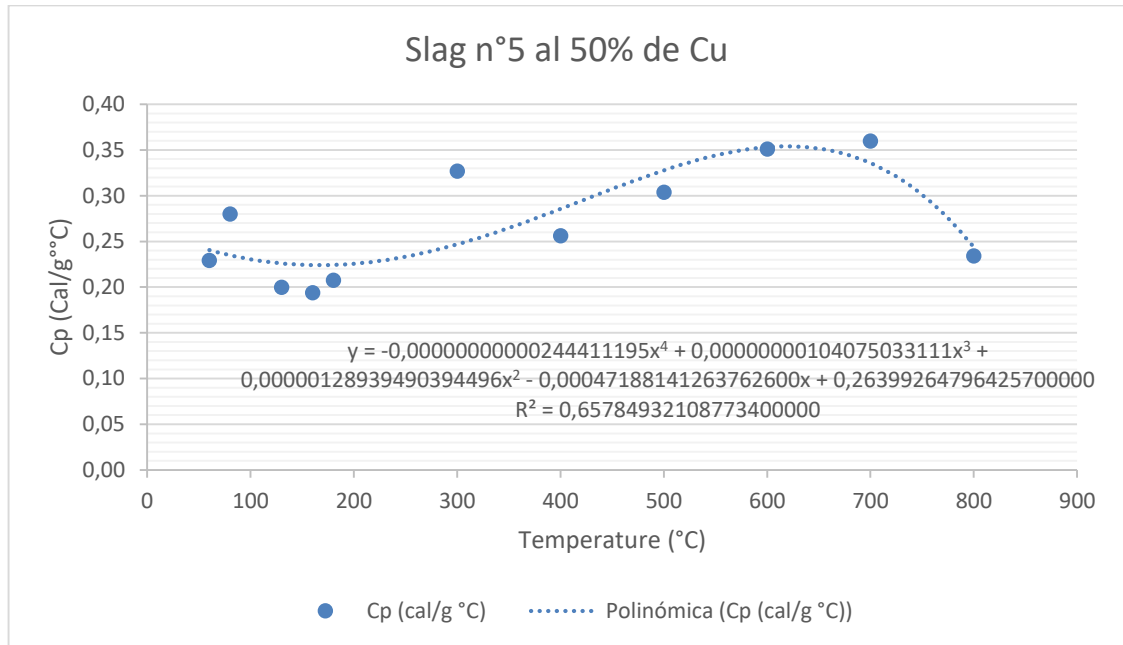


Gráfico 5 Comportamiento del Cp. vs T Slag n°5

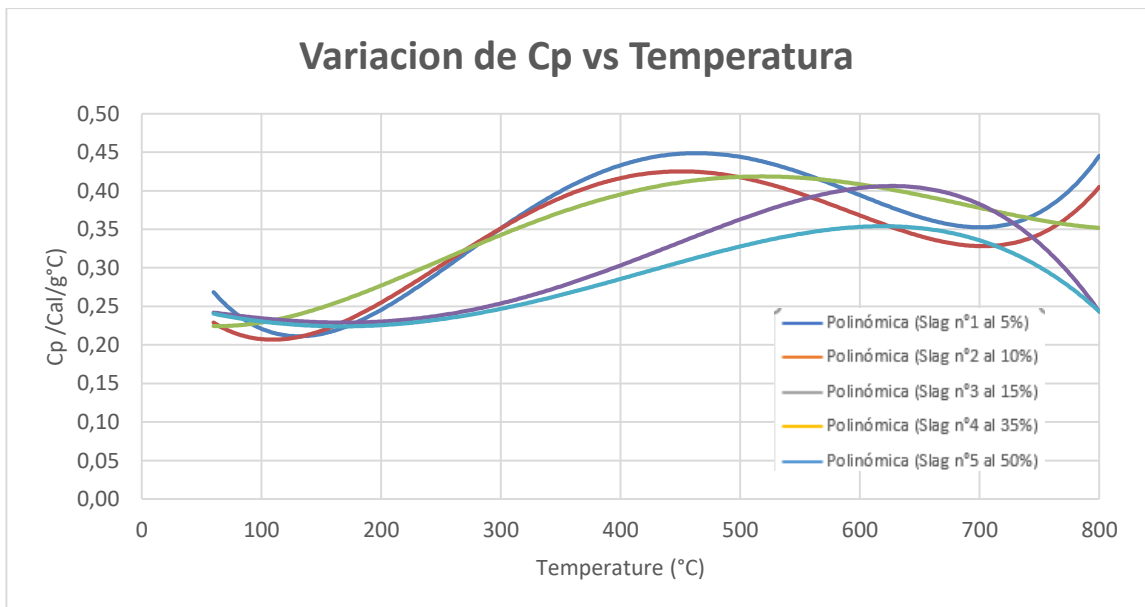


Gráfico 6 Variación de Cp. vs T de todos los slag

El gráfico 6 muestra todos los datos trazados directamente sin ningún filtro. Bajo una primera vista, es posible comprender que de 800 ° C a 60 ° C hay una fuerte variación de los valores de C_p , y se puede identificar las zonas de comportamiento. Entonces, hay una zona de baja temperatura, por debajo de 300 ° C, y otra por sobre de 700 ° C. Lo que se procedió a probar varias opciones y surgir un modelo aceptable.

Capítulo IV Modelamiento Matemático

Los datos experimentales se comportan como una ecuación polinomial de cuatro grados con la temperatura como variable. Un conjunto de cinco ecuaciones polinomiales surge de los cinco datos experimentales ajustados.

En la tabla 4, se encuentran todos los parámetros polinomiales A0, A1, A2, A3 y A4.

Tabla 5 Parámetros polinomiales

	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5
% Cu	5%	10%	15%	35%	50%
A0	-5.9847575.E-01	-1.5408650.E+00	-1.8747087.E+00	-1.3006980.E+00	-9.9195796.E-01
A1	6.8181078.E-03	1.7470033.E-02	2.2027840.E-02	1.6090552.E-02	1.2997666.E-02
A2	-1.5116670.E-05	-5.4223443.E-05	-7.4135764.E-05	-5.7249933.E-05	-4.6361104.E-05
A3	1.2425857.E-08	6.9658167.E-08	1.0371471.E-07	8.5938670.E-08	6.9244476.E-08
A4	-2.7043942.E-12	-3.1767922.E-11	-5.1447517.E-11	-4.5662975.E-11	-3.6517987.E-11

Parámetros polinomiales de cuatro grados. Los valores de este parámetro aparecen cuando los datos experimentales de 180 ° C a 800 ° C se fijan mediante una ecuación polinómica de cuatro grados.

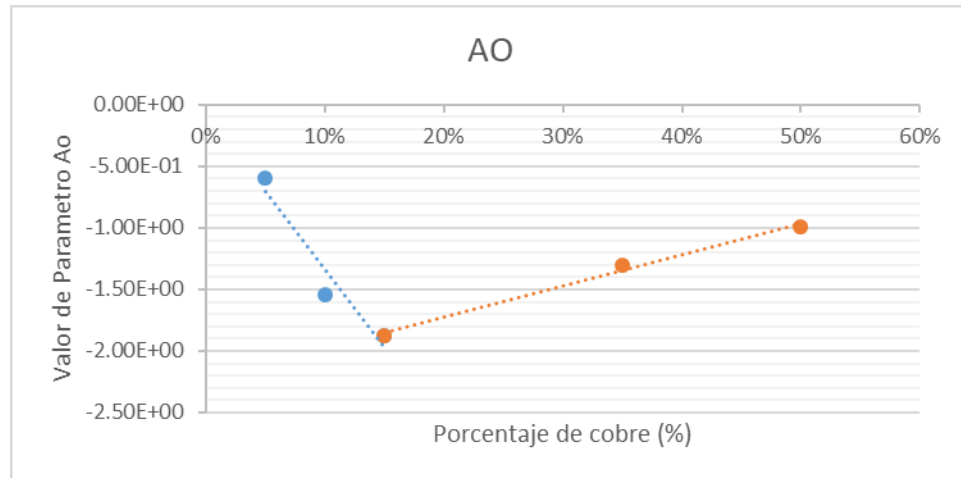


Gráfico 7 Valores de parámetro polinomial AO

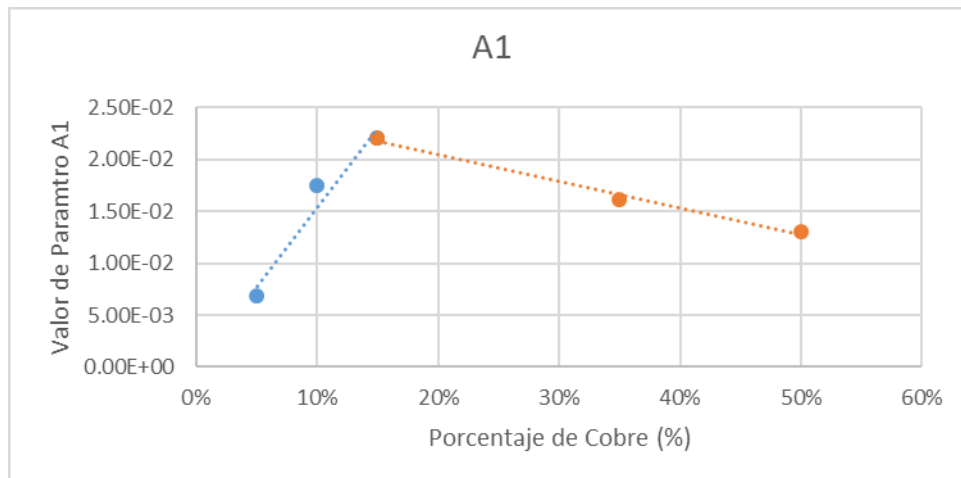


Gráfico 8 Valores de parámetro polinomial A1

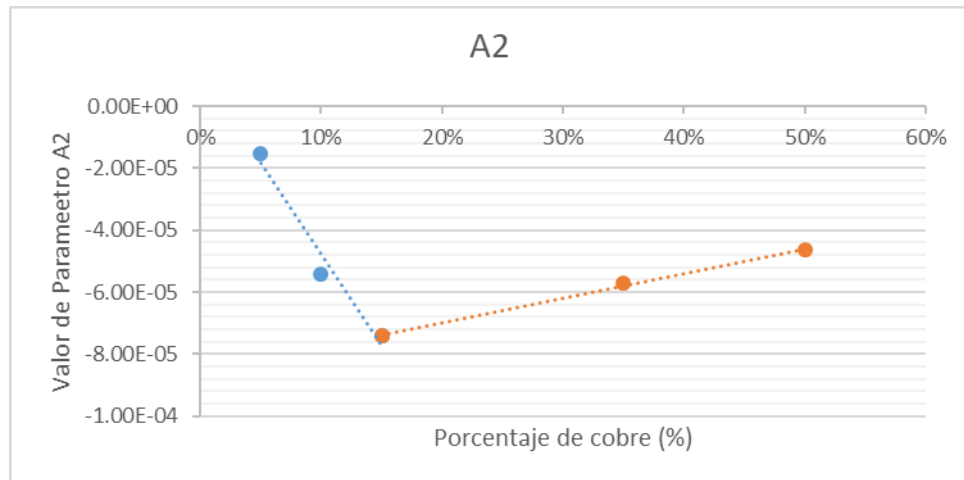


Gráfico 9 Valores de parámetro polinomial A2

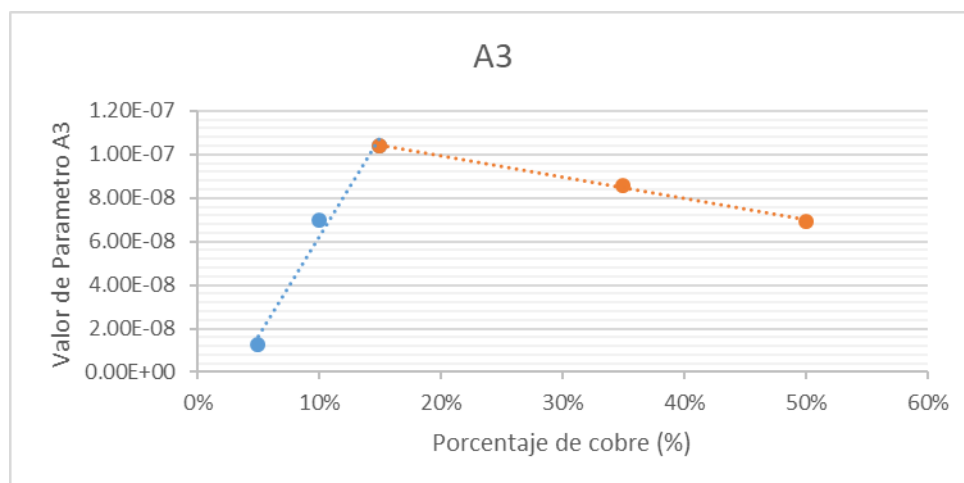


Gráfico 10 Valores de parámetro polinomial A3

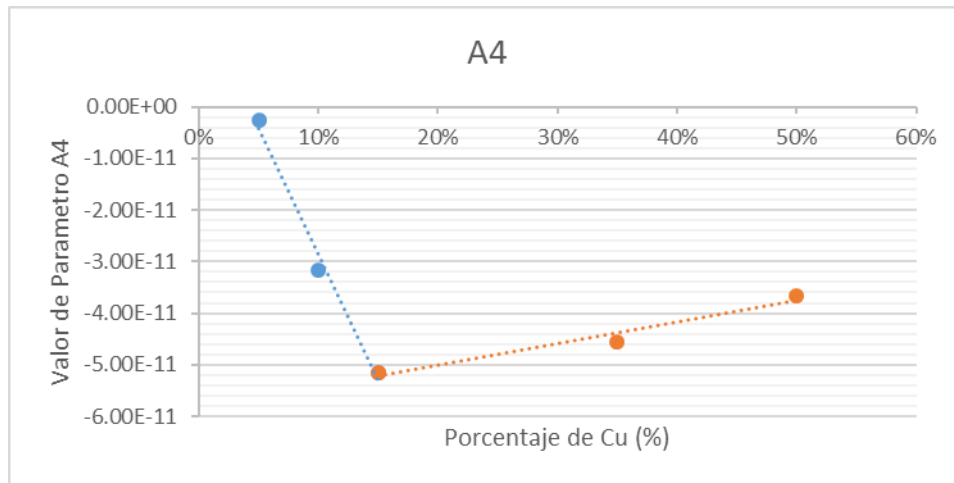


Gráfico 11 Valores de parámetro polinomial A4

Ahora, para cada uno de los parámetros hay cinco pares de parámetros de datos y un porcentaje de Cobre, por lo que se pudo encontrar la relación entre el parámetro y el porcentaje de cobre.

4.1 Modelo termodinámico

La forma de las ecuaciones lineales es $Ax = a + (b \times \% Cu)$ siendo % Cu el porcentaje de cobre de 0 a 100. Hay una zona para bajo porcentaje de cobre y una zona por alto porcentaje de cobre como se muestra en la tabla n° 5

Tabla 6 Parámetros lineales para el cálculo Cp.

	Bajo 15 %Cu		Sobre 15 %Cu	
	a	b	a	b
Para A0	-0.06178352	-12.7623296	-2.236105177	2.540950881
Para A1	0.000228928	0.152097321	0.025708869	-0.026010549
Para A2	1.11938E-05	-0.000590191	-8.57924E-05	7.96304E-05
Para A3	-2.93559E-08	9.12888E-07	1.18955E-07	-9.79671E-08
Para A4	2.01032E-11	-4.87431E-10	-5.8514E-11	4.19135E-11

La forma de la ecuación polinomial de Cp es la siguiente:

$$C_p = A_0 + (A_1 * T) + (A_2 * T^2) + (A_3 * T^3) + (A_4 * T^4)$$

Fórmula 2 Ecuación polinomial de Cp.

Donde

Cp: Calor específico

T: Temperatura

Usando los parámetros de la Tabla 5 y la ecuación polinomial de cuatro grados, ahora se podrían calcular los valores de CP experimental.

Tabla 7 Datos calculados de Cp.

	5 %Cu	10 %Cu	15 %Cu	15 %Cu	35 %Cu	50 %Cu
T (°C)	Cp	Cp	Cp	Cp	Cp	Cp
180	0.2073	0.2225	0.2309	0.2378	0.2132	0.2000
300	0.4070	0.4295	0.4329	0.4520	0.3527	0.2925
400	0.4363	0.4159	0.3879	0.3956	0.3241	0.2762
500	0.4073	0.3766	0.3550	0.3459	0.3184	0.2910
600	0.3718	0.3738	0.3957	0.3759	0.3702	0.3511
700	0.3712	0.4012	0.4462	0.4312	0.4088	0.3808
800	0.4364	0.3835	0.3172	0.3305	0.2581	0.2138

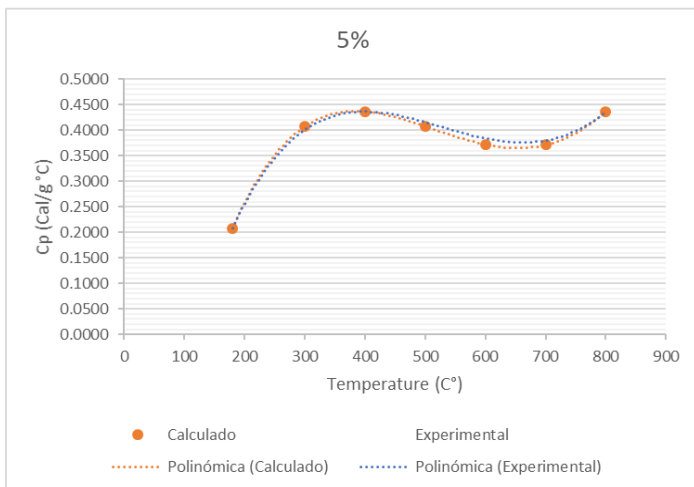


Gráfico 15 Datos experimentales Vs Calculados de slag a 5%

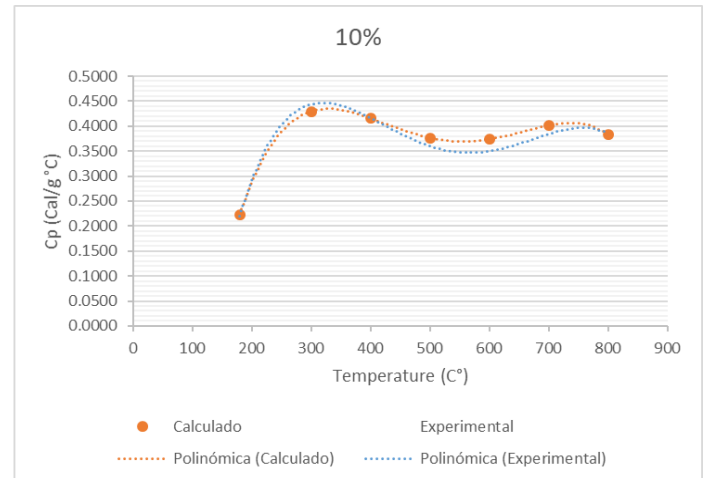


Gráfico 12 Datos experimentales Vs Calculados de slag a 10%

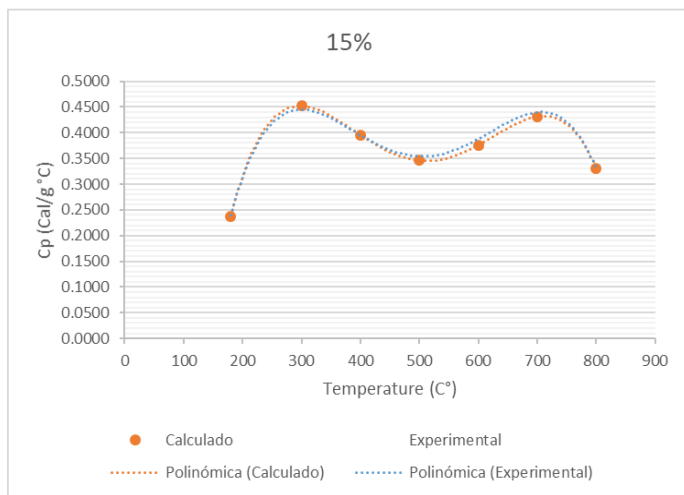


Gráfico 21 Datos experimentales Vs Calculados de slag a 15%

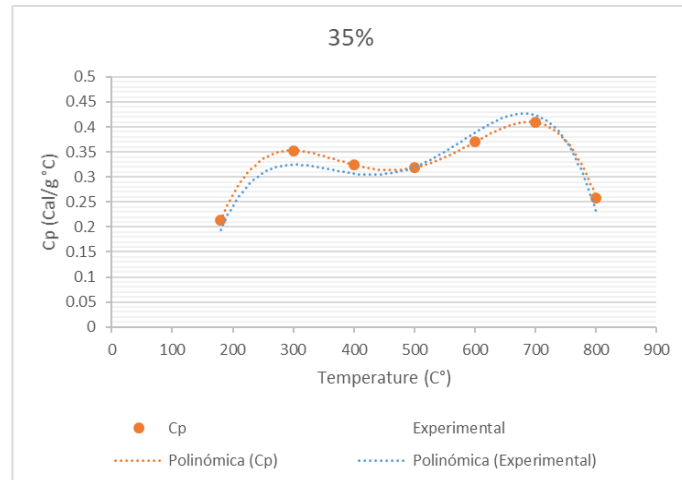


Gráfico 18 Datos experimentales Vs Calculados de slag a 35%

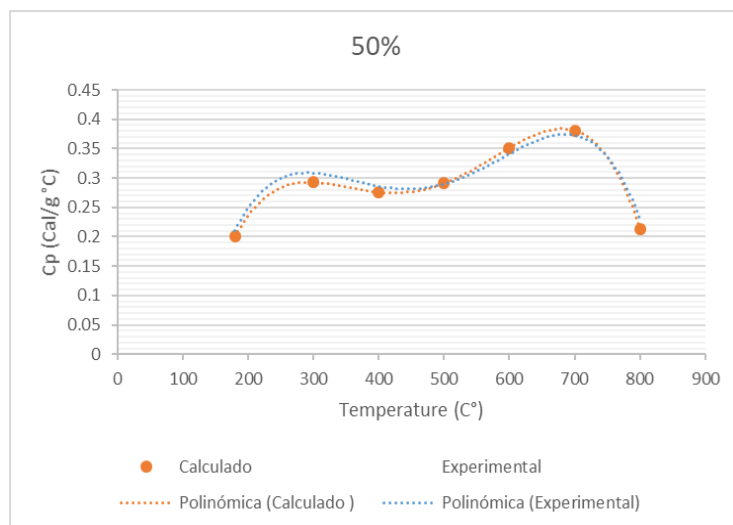


Gráfico 24 Datos experimentales Vs Calculados de slag a 50%

Capítulo V Discusiones Generales

El montaje utilizado permitió saber los diferentes C_p de las muestras de granalla, concluyendo que a medida que aumenta el porcentaje de cobre en cada una de las muestras su calor específico disminuye. Iniciando con un C_p de 0,4 para granalla de 5% y finalizando con 0,23 para la granalla de 50% lo que nos indica una fuerte correlación inversa entre la densidad del sólido y su calor específico.

Las impurezas pueden ser un factor relevante al momento de comenzar el proceso de quemado debido a que pueden interferir con el C_p . Aunque para este caso no fue de mayor relevancia, sin embargo, al momento de realizar las pruebas de 800 °C se observaron esferas plateadas donde se concluyó que era hierro fundido y adoptó esa forma debido al enlace de menor energía.

Los resultados son consistentes comparando el C_p del Cu, sin embargo, siempre existe un margen de error debido a factores como pérdidas de calor por parte de los sólidos al momento de vaciarlos al calorímetro debido al contacto que se genera con el medio ambiente. Por otro lado, existe la posibilidad que el calorímetro no estuviera totalmente aislado, aunque se realizaron las pruebas pertinentes del caso y finalmente la falta de precisión al momento de masar los objetos con los cuales se van a trabajar.

Una vez obtenido el modelo matemático, cuyo modelo establecido, una ecuación de grado cuatro, se calcularon nuevamente los C_p a partir de esta ecuación, los datos que se calcularon resultaron ser aproximados a los obtenidos de manera experimental, se graficaron los resultados y los C_p calculados poseían casi el mismo comportamiento que los C_p experimentales, como se muestran en las gráficas de la 12 a 16.

Como se puede apreciar por la riguridad de nuestros datos se ve como el rango de 180 a 800°C, presenta datos que pueden expresar el C_p a cierto grado de concentración de Cu de acuerdo a su temperatura de estudio, se observa claramente que en este rango hay dos

comportamientos lineales, con un punto de ruptura en el porcentaje de 15% Cu, dejando en evidencia que se encuentra un modelo establecido para Cp. Este modelo se establece en su primer comportamiento en un rango de 0 a 15% de concentración de Cu y el segundo comportamiento en un rango de 15 a 50% de concentración de Cu.

Para ejemplificar lo descrito, si se posee una escoria de 6% de Cu, entonces se debe utilizar los parámetros del primer comportamiento, que se encuentra de 0 a 15% de Cu. Por el contrario, al ejemplo anterior, si se posee una escoria de cobre e 27 % de Cu se debe usar los parámetros del segundo comportamiento, que se encuentra de 15 a 50% de Cu.

Se realizaron pruebas para el rango bajo 180, como se puede mostrar en los anexos del 8 al 11, los cuales se obtuvieron datos experimentales, pero no lograron satisfacer su resultado debido a que no eran concluyentes con los existentes en la bibliografía actual. Posteriormente se ejecutaron estudios bajo 100 °C, pero no se lograba obtener resultados de forma precisa.

De alguna forma no se logró obtener datos experimentales ni calculados de esta zona de estudios, ni muchos menos incluirlos en el modelo matemático, porque nuestro equipo ha sido fabricado por nosotros mismos y la zona de menos de 160 grados Celsius demostró ser extremadamente difícil, dejando ese estudio para posteriores análisis.

Capítulo VI Conclusiones

La manera de proseguir de los procesos pirometalúrgicos va a depender del mineral de alimentación, y de acuerdo con su objetivo se puede encontrar diferencias en el proceso, los parámetros operativos y la forma física, el tamaño y la orientación del recipiente. También mencionar que el proceso en si es bastante costoso, y especialmente cuando el precio del cobre baja, la economía del mundo minero se preocupa.

La investigación obtuvo un resultado satisfactorio aun que los prototipos hayan sido de fabricación propia del equipo de ejecución experimental llevando a cabo el cumplimiento del objetivo principal, de obtener los datos experimentales y el tratamiento numérico de los datos experimentales, y un modelo para el cálculo de escorias de fundición de cobre para varios porcentajes de cobre y temperaturas entre 800 °C y 60 °C. Aquí se ha introducido el modelo para el cálculo de la capacidad calorífica de la escoria de fundición de cobre. Ahora se puede hacer un balance energético de escorias de cobre fundidas.

Existe un rango de temperatura, bajo 180 °C hasta 80 °C, que debe explorarse más a fondo. No se logró cumplir el objetivo principal con este rango de estudio, porque el equipo experimental fue fabricado por el propio grupo de investigadores y la zona de menos de 160 grados Celsius demostró ser extremadamente difícil de manejar y los resultados que se obtenían no tenían resonancia con los existentes en bibliografía

Se lograron los objetivos experimentales los cuales correspondían a la construcción de un baño térmico (Calorímetro), En un principio la construcción de este artefacto represento un desafío debido a que jugaba un rol fundamental en todo el estudio experimental, y debía ser semejante al funcionamiento de uno convencional en el mercado, una vez construido el baño térmico (Calorímetro) se realizaron pruebas de aislación en el baño térmico (Calorímetro). También se lograron con satisfacción la realización de pruebas con

la bomba para la recirculación y homogeneidad del sistema y las pruebas de mediciones de pérdidas de temperatura del agua.

Los objetivos de diseño se lograron al cabo de 5 meses debido a que las primeras mediciones se tardaron por detalles de prototipo y construcción, que fueron resultas al poco tiempo, las primeras curvas experimentales se obtuvieron con precisión, debido a que el personal del laboratorio tenía un rol establecido y único en el procedimiento. La elaboración de curvas de temperatura en cada una de las etapas del proceso se encuentra en los anexos, la descripción y comparación entre las distintas granallas de escoria de cobre utilizadas para su respectiva recuperación energética se encuentra en el capítulo de resultados experimentales.

Cabe destacar que es de suma importancia el trabajo en equipo debido a los tiempos empleados en realizar cada una de las muestras de trabajo, ya que, de no ser así la demora por cada prueba hubiera sido considerable. Por otro lado, el error humano está siempre presente por lo que se debe realizar una rigurosa muestra de datos para que los resultados obtenidos sean lo más certeros posibles.

En consecuencia, este trabajo no solo corresponde al análisis de datos sino también a una riesgosa toma de los mismos debido a que se trabajó con altas temperaturas y en un momento al quemar la granalla de escoria de Cu esta salió expulsada por la presión debido a que estuvo durante varios días en agua, sin embargo, esta situación se manejó de la mejor manera posible, ya que, el encargado de quemar la granalla estaba utilizando los EPP correspondientes.

Finalmente, al efectuar este trabajo nos queda la grata experiencia de haber aprendido acerca de múltiples áreas metalurgistas, en específico de la granalla de cobre, lo cual aparte de ser muy interesante nos fortalece como profesionales integrales considerando que nos queda aún mucho camino por recorrer y este trabajo es una pequeña contribución

para un fin que se ve cada día aún más cercano que es obtener energía a partir de la granalla de escoria de cobre.

Bibliografía

1. Quingbo yu, J. I. (2015). Thermal energy recovery from high temperature blast furnace. China: Sevier.
2. [USM. (2017, Marzo 23). www.noticias.usm.cl. Retrieved from www.noticias.usm.cl
3. Cochilco. (2017). Sergio Hernández. Gobierno de Chile.
4. Bisweswar Das, Barada Kanta Mishra, Shivakumar Angadi, Siddharth Kumar Pradhan,. (2016). Characterization and recovery of copper values from. Retrieved from <https://journals.sagepub.com/home/wmr>
5. CODELCO. (2011). Granallador de escoria, Recuperación de energía.
6. Fagerström, C. (2015). Copper mining in Chile and its electric. Retrieved from Copper mining in Chile and its electric: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/91170/Fagerstrom_Christoffer.pdf;sequence=1
7. Hongyang Caoa,b,*, Guojuan Lia, Jimin Wanga, Zhiqiang Liu. (2016). Thermodynamic analysis of separating synchronously copper and. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029616001250>
8. M. Sáncheza, M. Sudburyb. (2013). PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF COPPER SLAG AND. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/26924099.pdf>
9. P. R. JOCHENS*. Pr. Eng.. B.Se. (Eng.) (Wits.). M.Se. (Eng.) (Wits.). Ph.D. (Wits.). (1980). The energy requirements of the mining and metallurgical industry in South Africa. Retrieved from <https://www.saimm.co.za/Journal/v080n09p331.pdf>
10. Prince Sarfo a, Avimanyu Das a, Gary Wyss b, Courtney Young. (2017). Recovery of metal values from copper slag and reuse of residual. Retrieved from www.elsevier.com/locate/wasman
11. R.R. Moskalyk , A.M. Alfantazi. (2003). Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687503002747>
12. SÁNCHEZ, M., PARADA, F., PARRA, R., MARQUEZ, F., JARA, R., CARRASCO, J.C., and PALACIOS, J. (2004). Management of copper pyrometallurgical slags: giving. Obtenido de <http://www.saimm.co.za/Conferences/MoltenSlags2004/543-Sanchez.pdf>
13. SKM, S. K. (2009). Proyecto multidisciplinario de recuperación de energía desde escoria cobre fundida. 14. Yu Li a, Wen-Bin Dai. (2017). Modifying hot slag and converting it into valueadded materials: A. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.171>

14. Proyecto multidisciplinario de recuperación de energía desde escoria de cobre fundida, SKM, Sinclair Knight Merzt, empresa de ingeniería australiana, filial Chile, 2009.-
15. Granallador de escoria, Recuperador de energía, presentación, Codelco El Salvador, Marzo 2011, El Salvador.
16. RAE. (2018). <http://dle.rae.es>. Retrieved from <http://dle.rae.es: http://dle.rae.es/?id=GLiJHu5>
17. Mch. (2015, Agosto 11). [/www.mch.cl](http://www.mch.cl). Retrieved from <http://www.mch.cl/reportajes/fundiciones-en-chile-una-discusion-necesaria>
18. Mch. (2018, Enero 17). [/www.mch.cl](http://www.mch.cl). Retrieved from <http://www.mch.cl/2018/01/17/fundicion-potrerrillos-codelco-sufre-grave-falla-estaria-detenido-enero>
19. Mch. (2015, Mayo 27). [/www.nuevamineria.com](http://www.nuevamineria.com) Retrieved from <http://www.nuevamineria.com/revista/codelco-evalua-opciones-para-el-cierre-de-fundicion-ventanas>
20. Flickr [/www.flickr.com](http://www.flickr.com) Retrieved from <https://www.flickr.com/photos/>
21. Mch. (2008, Abril, 14). [/www.mch.cl](http://www.mch.cl) Retrieved from <http://www.mch.cl/reportajes/fundicion-altonorte-avanza-en-su-expansion/>
22. Enami/www.Enami.cl Retrieved from <https://www.enami.cl/FundicionVidela>
23. <https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/document/communities/sear-chagres-2012.pdf>
24. <http://www.mch.cl/reportajes/fundiciones-en-chile-una-discusion-necesaria/>
25. file:///C:/Users/niith/Downloads/MI4100_03_Fusi_n_Teor_a_.pdf
26. Alvarez Uchuya, A. D. (17 de agosto de 2015). *slideshare*. Obtenido de slideshare: https://es.slideshare.net/uchuya_5/pirometalurgia-del-cobre-51738397

INDICE DE ANEXOS

ANEXOS **IV**

II. ANEXO N°1 DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 800°C **IV**

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	IV
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	V
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	VI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	VII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	VIII

III. ANEXO N°2 DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 700°C **IX**

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	IX
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	X
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	XI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	XII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	XIII

IV. ANEXO N°3 DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 600°C **XIV**

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	XIV
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	XV
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	XVI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	XVII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	XVIII

V. ANEXO N°4 DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 500°C **XIX**

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	XIX
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	XX
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	XXI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	XXIII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	XXIV

VI. ANEXO N°5 DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 400°C **XXV**

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	XXV
--	-----

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	XXVI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	XXVII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	XXVIII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	XXIX

VII.ANEXO N°6 DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 300°C XXX

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	XXX
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	XXXI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	XXXII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	XXXIII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	XXXIV

VIII.ANEXO N°7 DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 180°C XXXV

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	XXXV
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	XXXVI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	XXXVII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	XXXVIII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	XXXIX

IX.ANEXO N°8 DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 160°C XL

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	XL
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	XLI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	XLII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	XLIII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	XLIV

X.ANEXO N°9 DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 130°C XLV

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	XLV
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	XLVI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	XLVII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	XLVIII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	XLIX

XI.ANEXO N°10 DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 80°C L

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	L
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	LI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	LII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	LIII

MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	LIV
ANEXO N°11_DATOS EXPERIMENTALES DE TEMPERATURA DE 60°C	LV
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°1 AL 5% CU	LV
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°2 AL 10% CU	LVI
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°3 AL 15 % CU	LVII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°4 AL 35 % CU	LVIII
MUESTRA DE GRANALLA DE ESCORIA DE COBRE N°5 AL 50 % CU	LIX

XII.ARTICULO EN PROCESO DE PUBLICACIÓN ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ABSTRACT **LXII**

1- PYROMETALURGIC COPPER RECOVERY PROCESS	LXIII
2- COPPER SLAG THERMODYNAMIC INFORMATION	LXIV
3- DESCRIPTION OF THE HEAT CAPACITY EXPERIMENTAL MEASUREMENTS	LXV
4- EXPERIMENTAL DATA	LXV
5- DISCUSSION	LXVI
7- CONCLUSIONS	LXXII
8- REFERENCES	LXXII

ANEXOS

I. Anexo n°1 Datos experimentales de temperatura de 800°C

Temperatura de estudio es 800°C y 12 gr de especie
Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 8 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 800°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434,7
Calorímetro	350
Termómetro	16,7
Bomba	139
Granalla	12

Tabla 9 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 800°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	19,3
Temperatura final H2O	21,6
Temperatura inicial Granalla	821
Temperatura final Granalla	21,6

Tabla 10 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 800°C

Datos	
Agua	1369 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	2
DH vap	1079,2
G cal	0

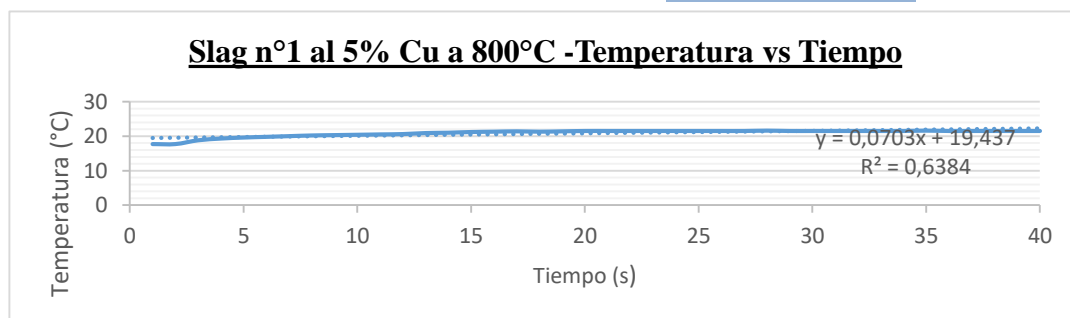


Gráfico 25 Slag n°1 al 5% de Cu a 800°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 11 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 800°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434,7
Calorímetro	350
Termómetro	16,7
Bomba	118.4
Granalla	12

Tabla 12 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 800°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	11.5
Temperatura final H2O	12.8
Temperatura inicial Granalla	837
Temperatura final Granalla	12.8

Tabla 13 Datos Experimentales de prueba n°2 a 800°C

Datos	
Agua	1762.1 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	2
DH vap	1079.2
G cal	0

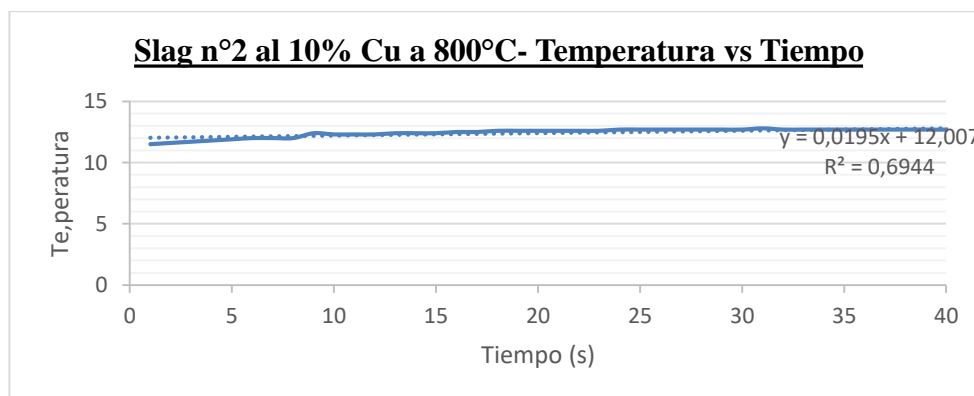


Gráfico 28 Slag n°2 al 10 % de Cu a 800°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 14 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 800°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434,7
Calorímetro	350
Termómetro	16,7
Bomba	118.4
Granalla	12

Tabla 15 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 800°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	12.7
Temperatura final H2O	14.2
Temperatura inicial Granalla	813
Temperatura final Granalla	14.2

Tabla 16 Datos Experimentales de prueba n°3 a 800°C

Datos	
Agua	1761.3 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	2
DH vap	1079
G cal	0

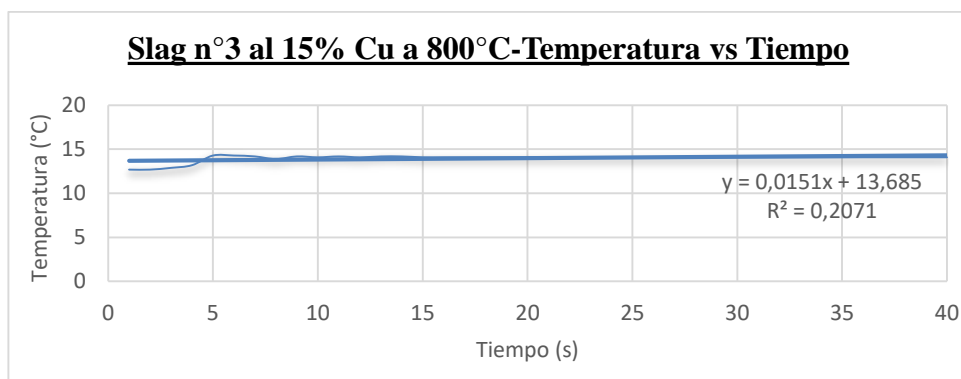


Gráfico 29 Slag n°3 al 15 % de Cu a 800°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 17 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 800°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434,7
Calorímetro	350
Termómetro	16,7
Bomba	118.4
Granalla	12

Tabla 18 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 800°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	13.7
Temperatura final H2O	14.6
Temperatura inicial Granalla	824
Temperatura final Granalla	14.6

Tabla 19 Datos Experimentales de prueba n°4 a 800°C

Datos	
Agua	1761.3 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	2
DH vap	1079
G cal	0

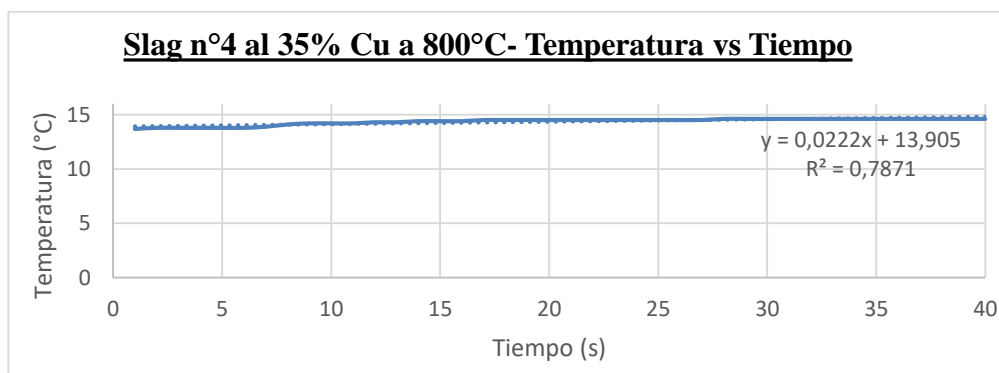


Gráfico 30 Slag n°4 al 35 % de Cu a 800°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 20 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 800°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434,7
Calorímetro	350
Termómetro	16,7
Bomba	118.4
Granalla	12

Tabla 21 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 800°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	14.5
Temperatura final H2O	15.5
Temperatura inicial Granalla	843
Temperatura final Granalla	15.5

Tabla 22 Datos Experimentales de prueba n°5 a 800°C

Datos	
Agua	1783.7 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	2
DH vap	1079
G cal	0

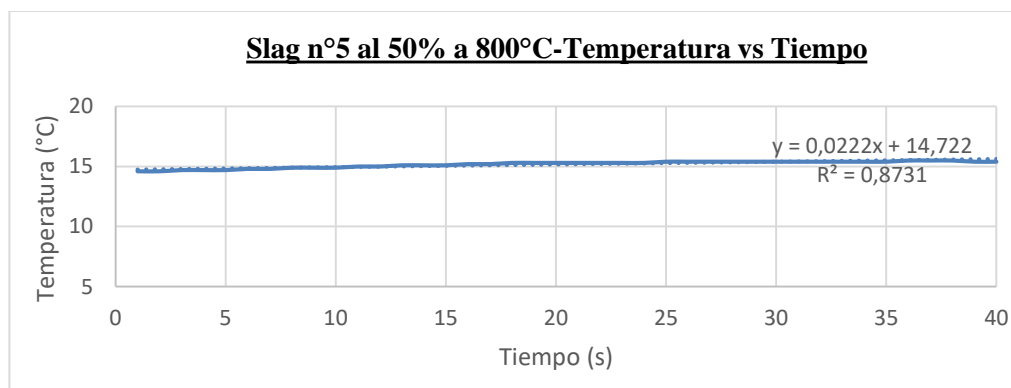


Gráfico 31 Slag n°5 al 50 % de Cu a 800°C- Temperatura vs Tiempo

II. Anexo n°2 Datos experimentales de temperatura de 700°C

Temperatura de estudio es 700°C y 12 gr de especie

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 23 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 700°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	342.2
Termómetro	16,7
Bomba	107.4
Granalla	12

Tabla 24 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 700°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	26.4
Temperatura final H2O	27.7
Temperatura inicial Granalla	700
Temperatura final Granalla	27.7

Tabla 25 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 700°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.75
DH vap	944.3
G cal	0

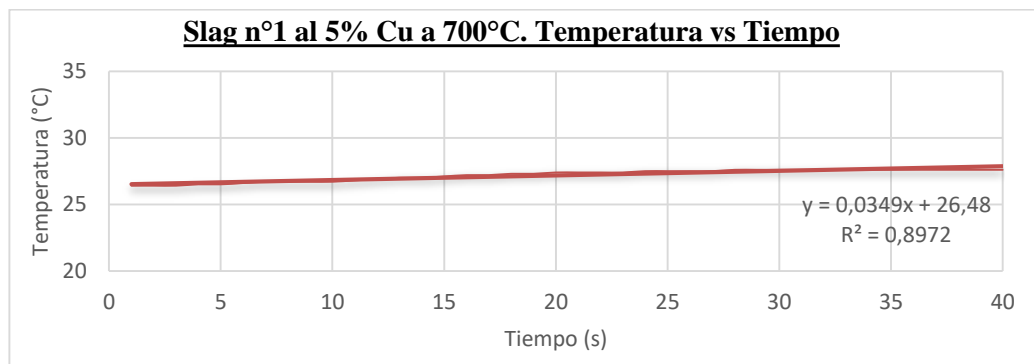


Gráfico 32 Slag n°1 al 5% de Cu a 700°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 26 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 700°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.8
Calorímetro	342.3
Termómetro	16,7
Bomba	107.2
Granalla	12

Tabla 27 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 700°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	27.1
Temperatura final H2O	28.5
Temperatura inicial Granalla	700
Temperatura final Granalla	28.5

Tabla 28 Datos Experimentales de prueba n°2 a 700°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.75
DH vap	944.3
G cal	0

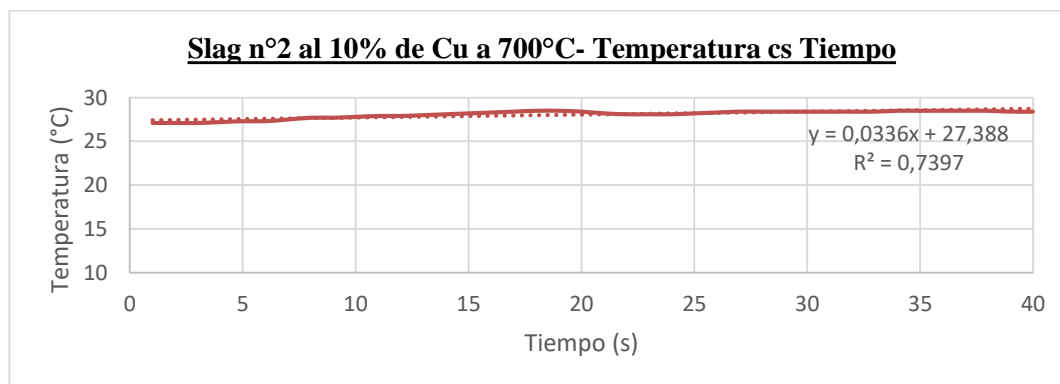


Gráfico 33 Slag n°2 al 10 % de Cu a 700°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 29 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 700°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	342.9
Termómetro	16,7
Bomba	108.1
Granalla	12

Tabla 30 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 700°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	28.7
Temperatura final H2O	30.5
Temperatura inicial Granalla	700
Temperatura final Granalla	30.5

Tabla 31 Datos Experimentales de prueba n°3 a 700°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.75
DH vap	944.3
G cal	0

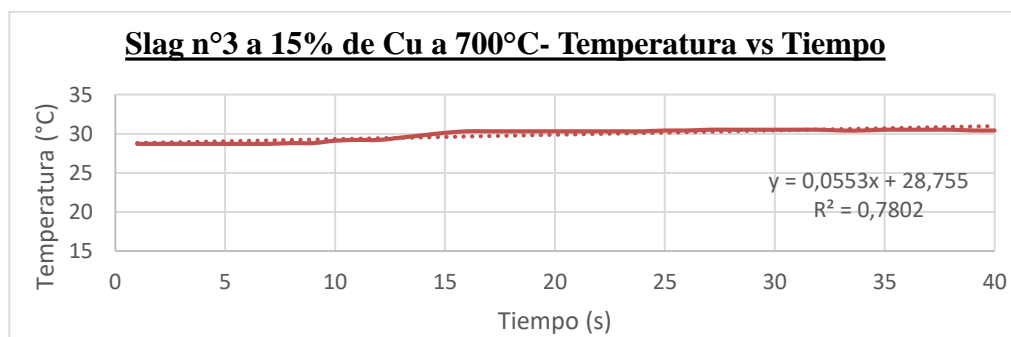


Gráfico 34 Slag n°3 al 15 % de Cu a 700°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 32 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 700°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.8
Calorímetro	342.3
Termómetro	16,7
Bomba	108
Granalla	12

Tabla 33 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 700°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	28.1
Temperatura final H2O	30
Temperatura inicial Granalla	700
Temperatura final Granalla	30

Tabla 34 Datos Experimentales de prueba n°4 a 700°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.75
DH vap	944.3
G cal	0

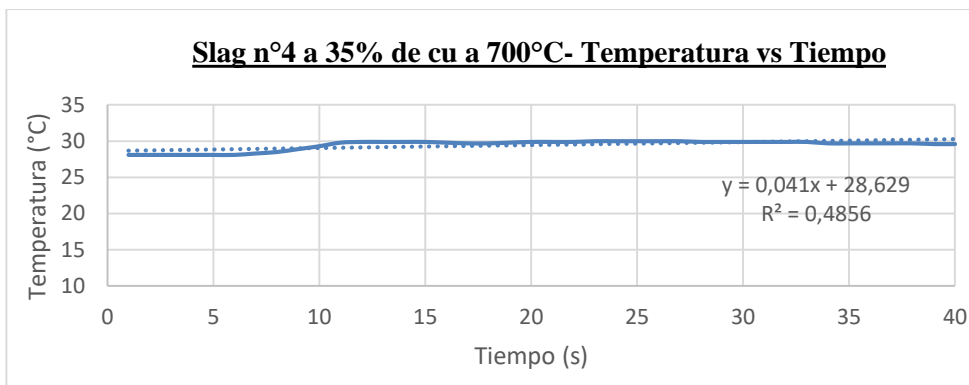


Gráfico 35 Slag n°4 al 35 % de Cu a 700°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 35 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 700°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	343
Termómetro	16,7
Bomba	108.1
Granalla	12

Tabla 36 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 700°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	28.5
Temperatura final H2O	29.8
Temperatura inicial Granalla	700
Temperatura final Granalla	29.8

Tabla 37 Datos Experimentales de prueba n°5 a 700°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.75
DH vap	944.3
G cal	0

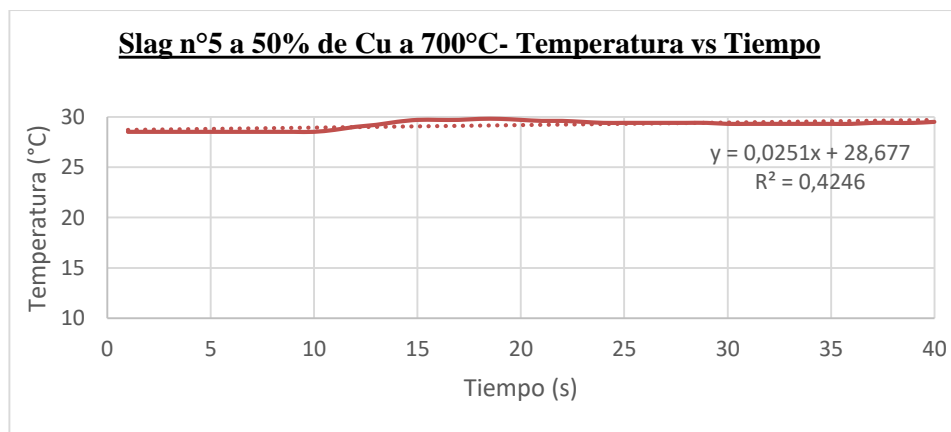


Gráfico 36 Slag n°5 al 50 % de Cu a 700°C- Temperatura vs Tiempo

III. Anexo n°3 Datos experimentales de temperatura de 600°C

Temperatura de estudio es 600°C y 12 gr de especie
Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 38 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 600°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434.7
Calorímetro	361.8
Termómetro	16,7
Bomba	106.7
Granalla	12

Tabla 39 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 600°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	13.1
Temperatura final H2O	14.3
Temperatura inicial Granalla	616
Temperatura final Granalla	14.3

Tabla 40 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 600°C

Datos	
Agua	1810 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.5
DH vap	809.4
G cal	0

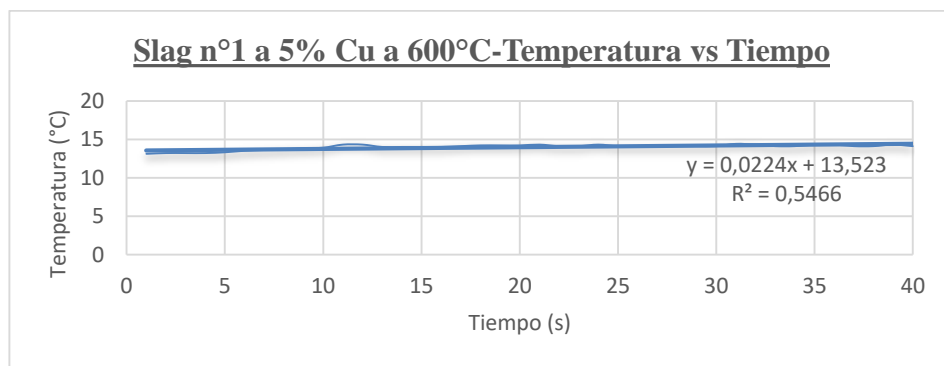


Gráfico 37 Slag n°1 al 5% de Cu a 600°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 41 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 600°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434.7
Calorímetro	361.8
Termómetro	16,7
Bomba	106.7
Granalla	12

Tabla 42 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 600°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	15.2
Temperatura final H2O	16.1
Temperatura inicial Granalla	600
Temperatura final Granalla	16.1

Tabla 43 Datos Experimentales de prueba n°2 a 600°C

Datos	
Agua	1814.2 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.5
DH vap	809.4
G cal	0

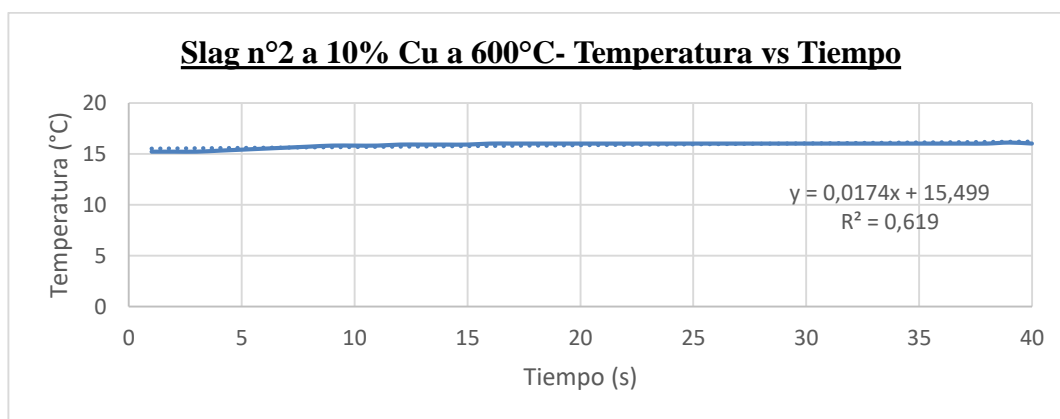


Gráfico 40 Slag n°2 al 10 % de Cu a 600°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 44 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 600°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434.7
Calorímetro	361.8
Termómetro	16,7
Bomba	106.7
Granalla	12

Tabla 45 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 600°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	16.5
Temperatura final H2O	17.5
Temperatura inicial Granalla	605
Temperatura final Granalla	17.5

Tabla 46 Datos Experimentales de prueba n°3 a 600°C

Datos

Agua	1801 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.5
DH vap	809.4
G cal	0

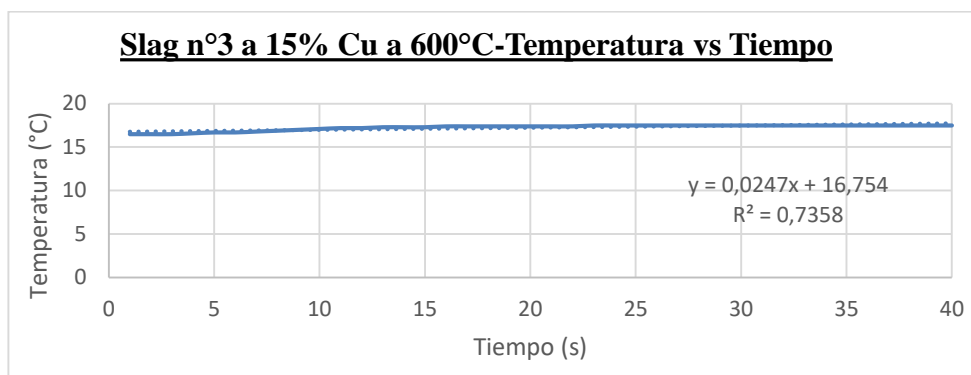


Gráfico 41 Slag n°3 al 15 % de Cu a 600°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 47 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 600°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434.7
Calorímetro	361.8
Termómetro	16,7
Bomba	106.7
Granalla	12

Tabla 48 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 600°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	17.8
Temperatura final H2O	18.5
Temperatura inicial Granalla	606
Temperatura final Granalla	18.5

Tabla 49 Datos Experimentales de prueba n°4 a 600°C

Datos	
Agua	1838.5 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.5
DH vap	809.4
G cal	0

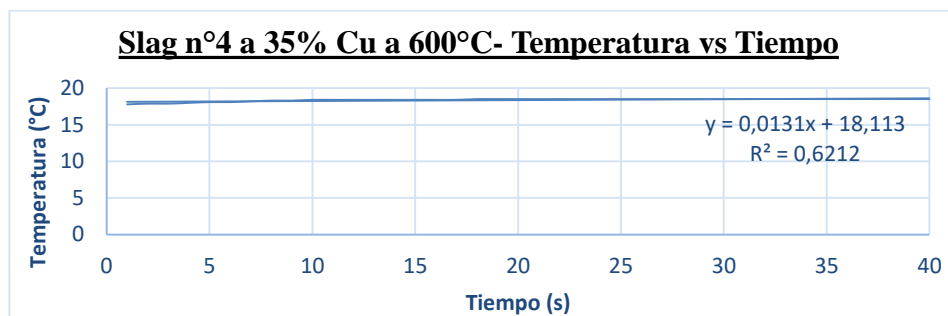


Gráfico 42 Slag n°4 al 35 % de Cu a 600°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 50 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 600°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434.7
Calorímetro	361.8
Termómetro	16,7
Bomba	106.7
Granalla	12

Tabla 51 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 600°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	18.9

Temperatura final H2O	19.8
Temperatura inicial Granalla	597
Temperatura final Granalla	19.8

Tabla 52 Datos Experimentales de prueba n°5 a 600°C

Datos	
Agua	1801.1 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.5
DH vap	944.3
G cal	0

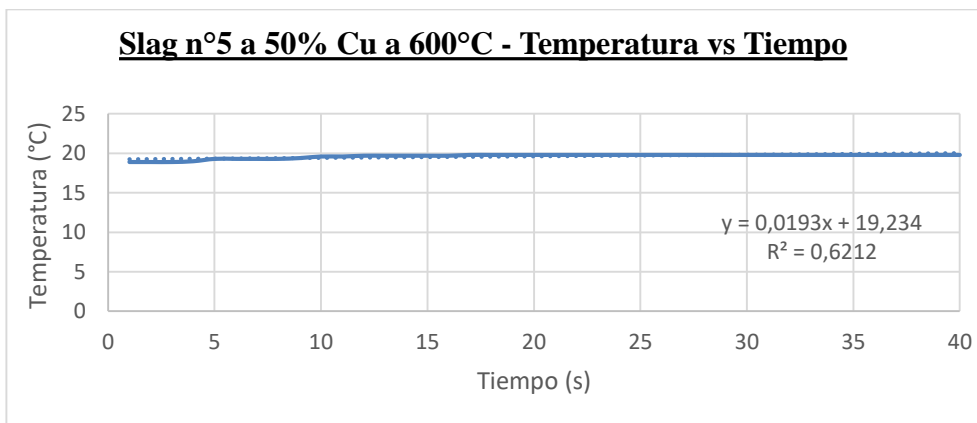


Gráfico 43 Slag n°5 al 50 % de Cu a 600°C- Temperatura vs Tiempo

IV. Anexo n°4 Datos experimentales de temperatura de 500°C

Temperatura de estudio es 500°C y 12 gr de especie

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 53 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 500°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	341.9
Termómetro	16,7

Bomba	107.6
Granalla	12

Tabla 54 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 500°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	23.4
Temperatura final H2O	24.5
Temperatura inicial Granalla	500
Temperatura final Granalla	24.5

Tabla 55 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 500°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.25
DH vap	674.5
G cal	0

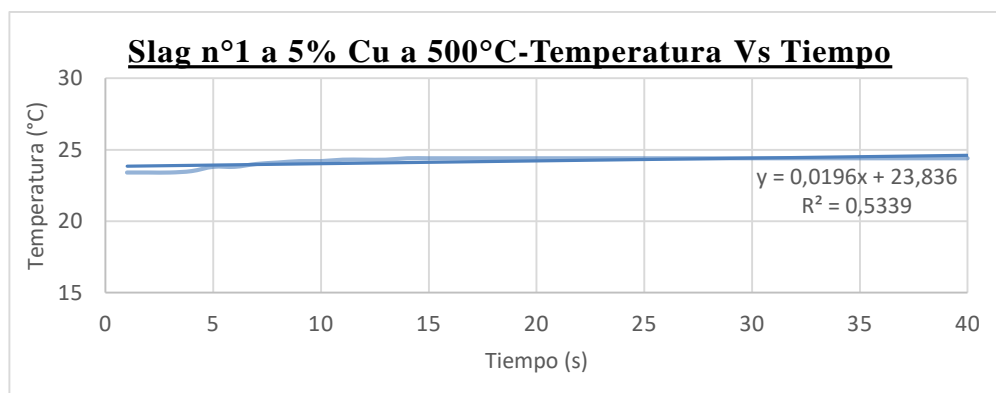


Gráfico 44 Slag n°1 al 5% de Cu a 500°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla

de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 56 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 500°C

Datos	Masa (gr)
-------	-----------

Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	342
Termómetro	16,7
Bomba	107.5
Granalla	12

Tabla 57 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 500°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	24.2
Temperatura final H2O	25.2
Temperatura inicial Granalla	500
Temperatura final Granalla	25.2

Tabla 58 Datos Experimentales de prueba n°2 a 500°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.25
DH vap	674.5
G cal	0

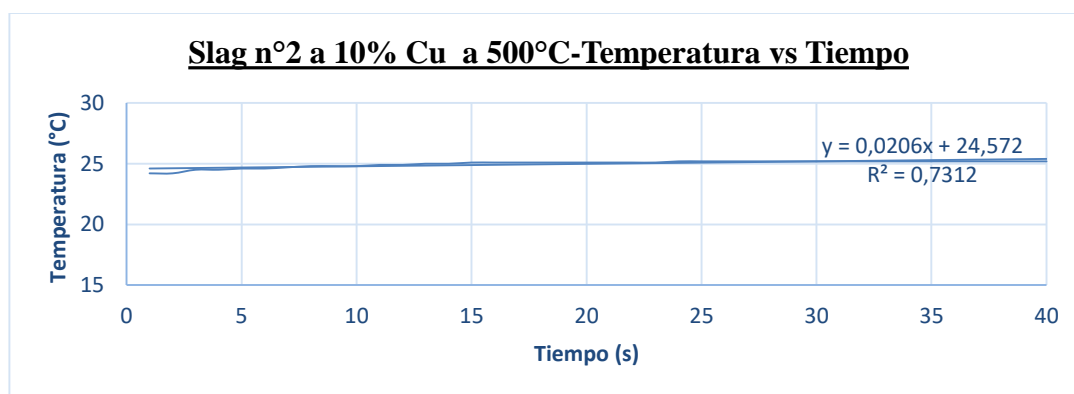


Gráfico 47 Slag n°2 al 10 % de Cu a 500°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 59 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 500°C

Datos	Masa (gr)
-------	-----------

Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	341.8
Termómetro	16,7
Bomba	107.6
Granalla	12

Tabla 60 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 500°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	24.8
Temperatura final H2O	25.7
Temperatura inicial Granalla	500
Temperatura final Granalla	25.7

Tabla 61 Datos Experimentales de prueba n°3 a 500°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.25
DH vap	674.5
G cal	0

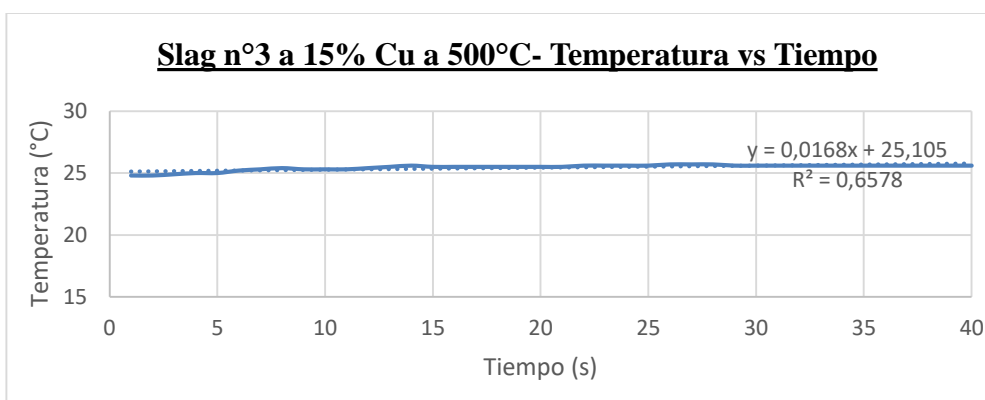


Gráfico 48 Slag n°3 al 15 % de Cu a 500°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 62 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 500°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	341.9
Termómetro	16,7
Bomba	107.6
Granalla	12

Tabla 63 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 500°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	25.4
Temperatura final H2O	26.6
Temperatura inicial Granalla	500
Temperatura final Granalla	26.6

Tabla 64 Datos Experimentales de prueba n°4 a 500°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.25
DH vap	674.5
G cal	0

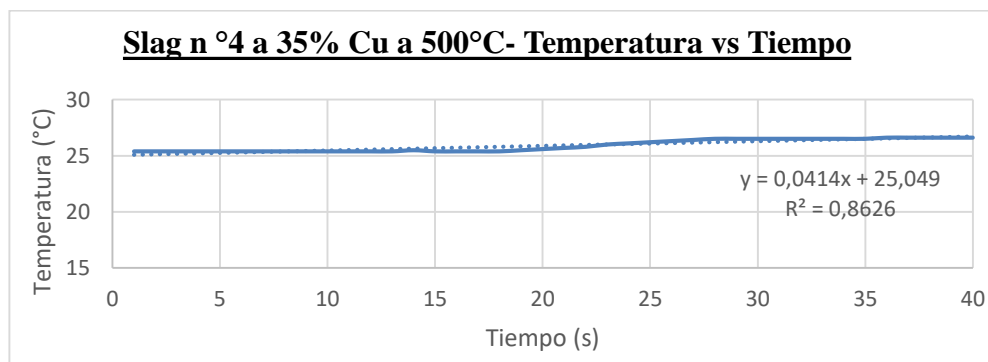


Gráfico 49 Slag n°4 al 35 % de Cu a 500°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 65 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 500°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	342.2
Termómetro	16,7
Bomba	107.2
Granalla	12

Tabla 66 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 500°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	25.9
Temperatura final H2O	26.6
Temperatura inicial Granalla	500
Temperatura final Granalla	26.7

Tabla 67 Datos Experimentales de prueba n°5 a 500°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1.25
DH vap	674.5
G cal	0

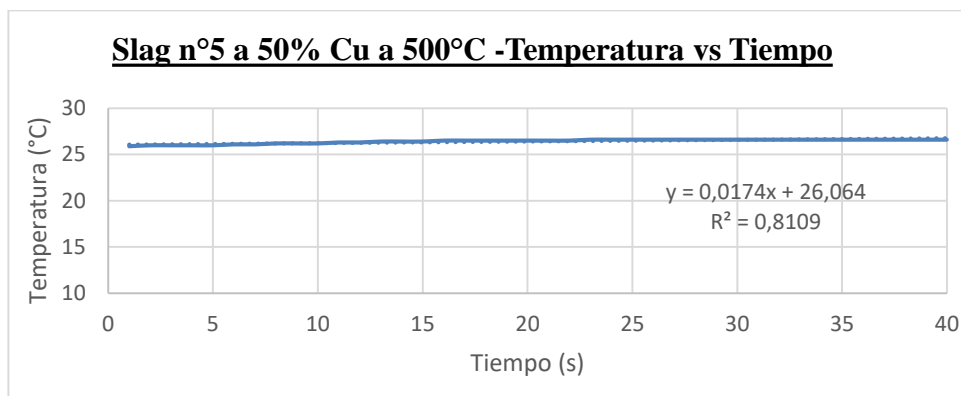


Gráfico 50 Slag n°5 al 50 % de Cu a 500°C- Temperatura vs Tiempo

V. Anexo n°5 Datos experimentales de temperatura de 400°C

Temperatura de estudio es 400°C y 12 gr de especie

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 68 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 400°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434.7
Calorímetro	350
Termómetro	16,7
Bomba	139
Granalla	12

Tabla 69 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 400°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	10.9
Temperatura final H2O	11.7
Temperatura inicial Granalla	401.1
Temperatura final Granalla	11.7

Tabla 70 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 400°C

Datos	
Agua	1780.3 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1
DH vap	539.6
G cal	0

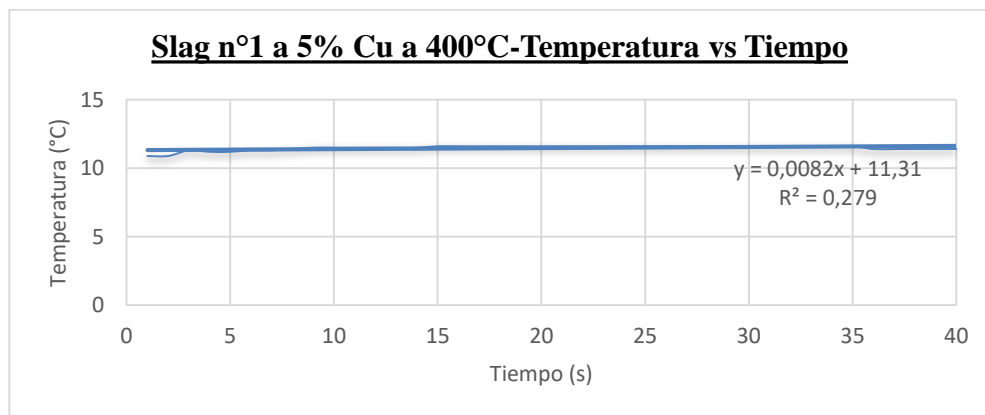


Gráfico 51 Slag n°1 al 5% de Cu a 400°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 71 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 400°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434.7
Calorímetro	350
Termómetro	16,7
Bomba	139
Granalla	12

Tabla 72 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 400°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	11.4
Temperatura final H2O	12.1
Temperatura inicial Granalla	403
Temperatura final Granalla	12.1

Tabla 73 Datos Experimentales de prueba n°2 a 400°C

Datos	
Agua	1812.1 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1
DH vap	539.6
G cal	0

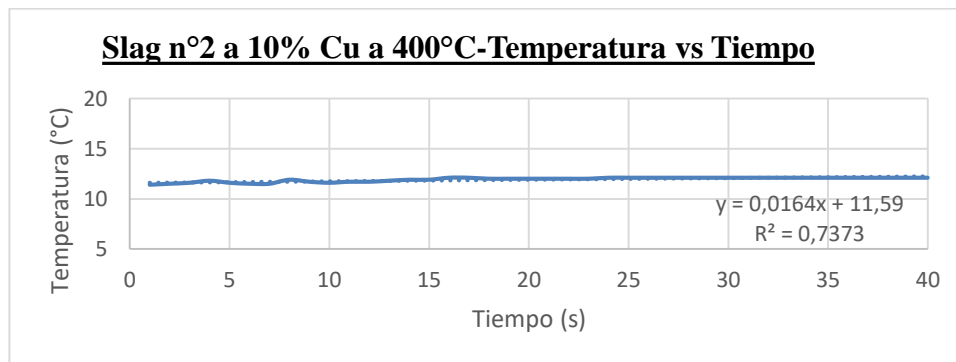


Gráfico 54 Slag n°2 al 10 % de Cu a 400°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 74 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 400°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434.7
Calorímetro	350
Termómetro	16,7
Bomba	139
Granalla	12

Tabla 75 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 400°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	11.8
Temperatura final H2O	12.6
Temperatura inicial Granalla	408
Temperatura final Granalla	12.6

Tabla 76 Datos Experimentales de prueba n°3 a 400°C

Datos	
Agua	1756.9 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1
DH vap	539.6
G cal	0

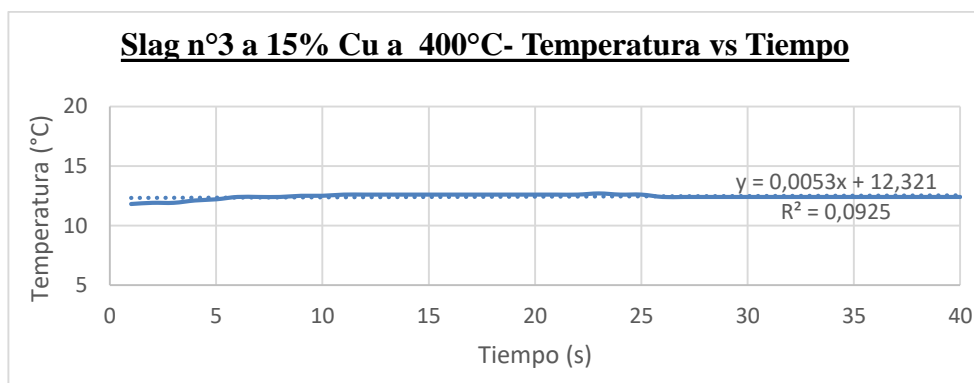


Gráfico 55 Slag n°3 al 15 % de Cu a 400°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 77 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 400°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434.7
Calorímetro	350
Termómetro	16,7
Bomba	139
Granalla	12

Tabla 78 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 400°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	12.3
Temperatura final H2O	12.9
Temperatura inicial Granalla	418
Temperatura final Granalla	12.9

Tabla 79 Datos Experimentales de prueba n°4 a 400°C

Datos	
Agua	1774.9 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1
DH vap	539.6
G cal	0

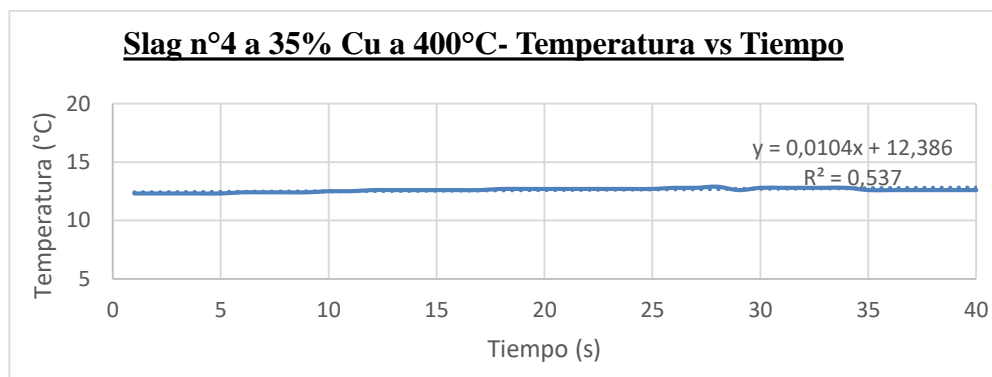


Gráfico 56 Slag n°4 al 35 % de Cu a 400°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 80 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 400°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434.7
Calorímetro	350
Termómetro	16,7
Bomba	139
Granalla	12

Tabla 81 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 400°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	12.7
Temperatura final H2O	13.2
Temperatura inicial Granalla	406
Temperatura final Granalla	13.2

Tabla 82 Datos Experimentales de prueba n°5 a 400°C

Datos	
Agua	1768 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	1
DH vap	539.6
G cal	0

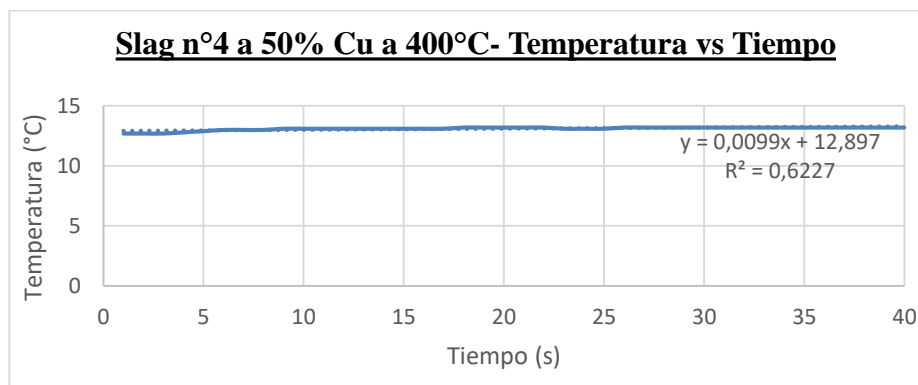


Gráfico 57 Slag n°5 al 50 % de Cu a 400°C- Temperatura vs Tiempo

VI. Anexo n°6 Datos experimentales de temperatura de 300°C

Temperatura de estudio es 300°C y 12 gr de especie

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 83 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 300°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	340.3
Termómetro	16,7
Bomba	107.7
Granalla	12

Tabla 84 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 300°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	20.4
Temperatura final H2O	21
Temperatura inicial Granalla	300
Temperatura final Granalla	21

Tabla 85 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 300°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.9
DH vap	485.64
G cal	0

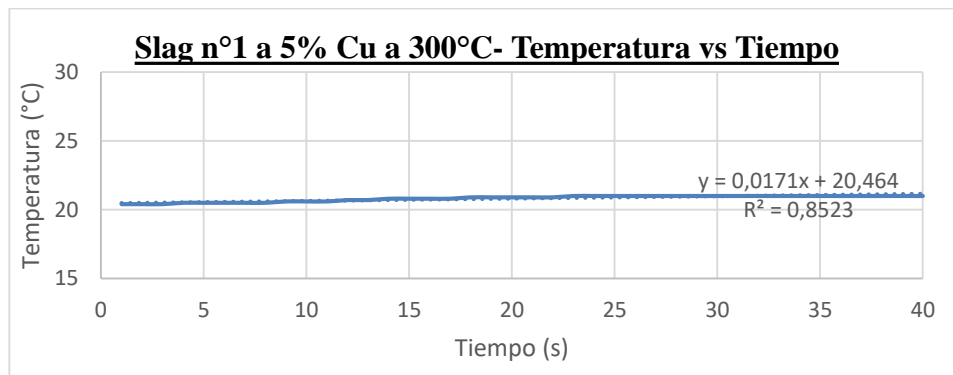


Gráfico 58 Slag n°1 al 5% de Cu a 300°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 86 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 300°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	341.2
Termómetro	16,7
Bomba	107.3
Granalla	12

Tabla 87 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 300°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	21.3
Temperatura final H2O	22
Temperatura inicial Granalla	300
Temperatura final Granalla	22

Tabla 88 Datos Experimentales de prueba n°2 a 300°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.9
DH vap	485.64
G cal	0

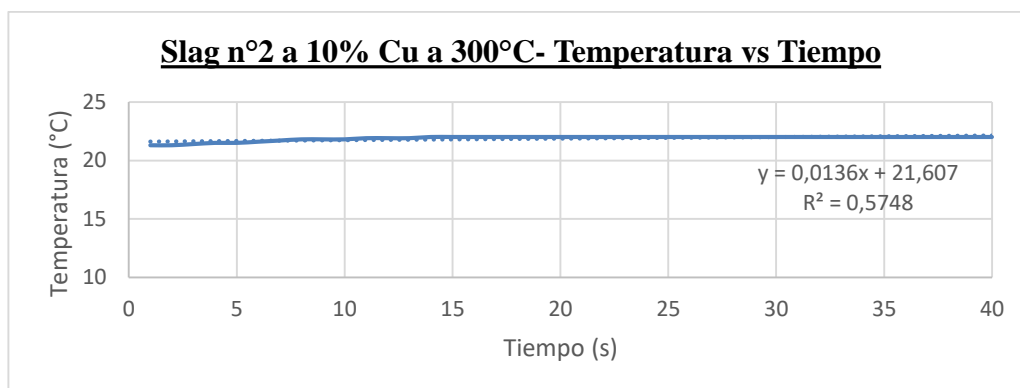


Gráfico 61 Slag n°2 al 10 % de Cu a 180°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 89 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 300°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	339.6
Termómetro	16,7
Bomba	106.8
Granalla	12

Tabla 90 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 300°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	19-1
Temperatura final H2O	20
Temperatura inicial Granalla	300
Temperatura final Granalla	20

Tabla 91 Datos Experimentales de prueba n°3 a 300°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.9
DH vap	485.64
G cal	0

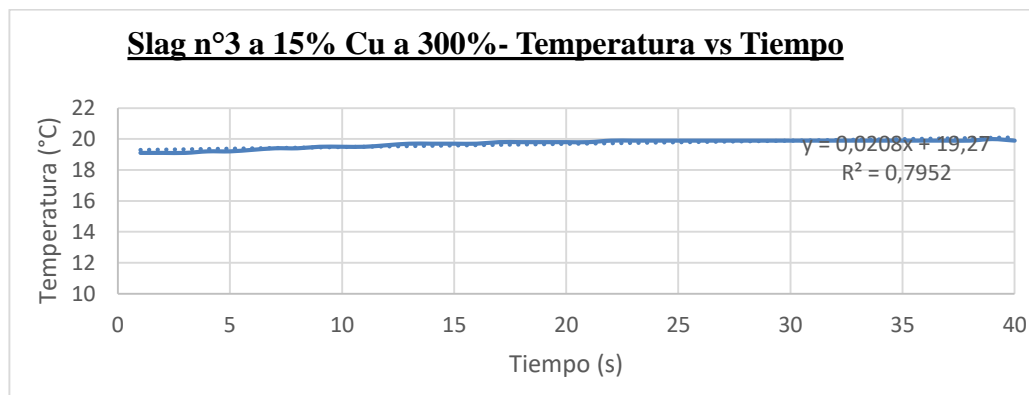


Gráfico 62 Slag n°3 al 15 % de Cu a 300°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 92 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 300°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.5
Calorímetro	340.2
Termómetro	16,7
Bomba	107.3
Granalla	12

Tabla 93 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 300°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	22.2
Temperatura final H2O	22.6
Temperatura inicial Granalla	300
Temperatura final Granalla	22.6

Tabla 94 Datos Experimentales de prueba n°4 a 300°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.9
DH vap	485.64
G cal	0

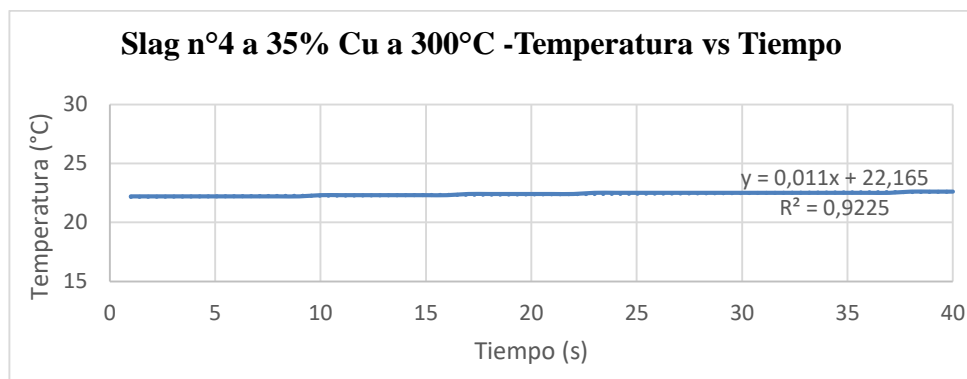


Gráfico 63 Slag n°4 al 35 % de Cu a 300°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 95 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 300°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	341.8
Termómetro	16,7
Bomba	107.6
Granalla	12

Tabla 96 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 300°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	22.8
Temperatura final H2O	23.2
Temperatura inicial Granalla	300
Temperatura final Granalla	23.2

Tabla 97 Datos Experimentales de prueba n°5 a 300°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.9
DH vap	485.64
G cal	0

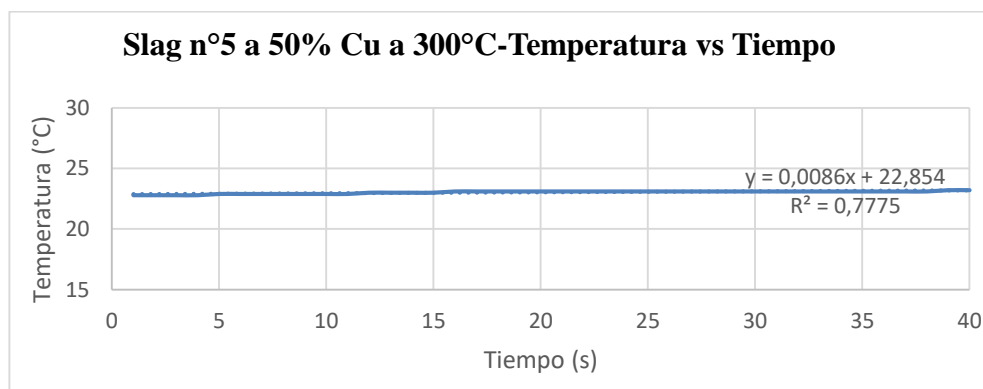


Gráfico 64 Slag n°5 al 50 % de Cu a 300°C- Temperatura vs Tiempo

VII. Anexo n°7 Datos experimentales de temperatura de 180°C

Temperatura de estudio es 180°C y 82.7 gr de especie

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 98 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 180°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	342.1
Termómetro	16.6
Bomba	107.6
Granalla	82.7

Tabla 99 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 180°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	21.1
Temperatura final H2O	22.6
Temperatura inicial Granalla	180
Temperatura final Granalla	22.6

Tabla 100 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 180°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.75
DH vap	404.7
G cal	0

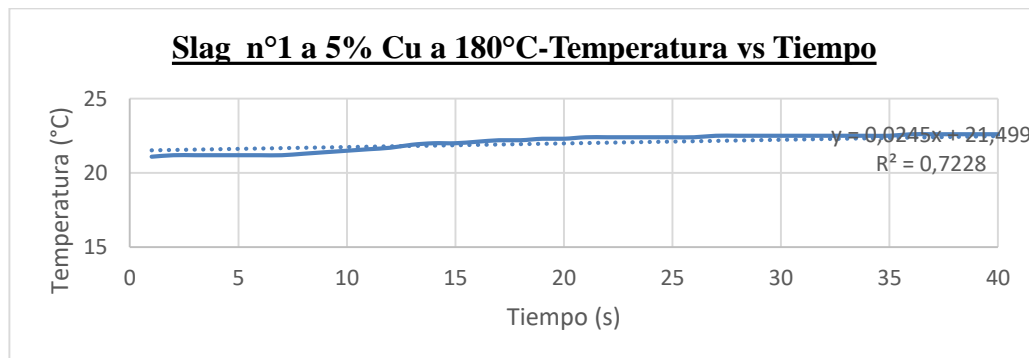


Gráfico 65 Slag n°1 al 5% de Cu a 180°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 101 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 180°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	342.3
Termómetro	16.6
Bomba	107.9
Granalla	82.7

Tabla 102 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 180°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	22
Temperatura final H2O	23.6
Temperatura inicial Granalla	180
Temperatura final Granalla	23.6

Tabla 103 Datos Experimentales de prueba n°2 a 180°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.75
DH vap	404.7
G cal	0

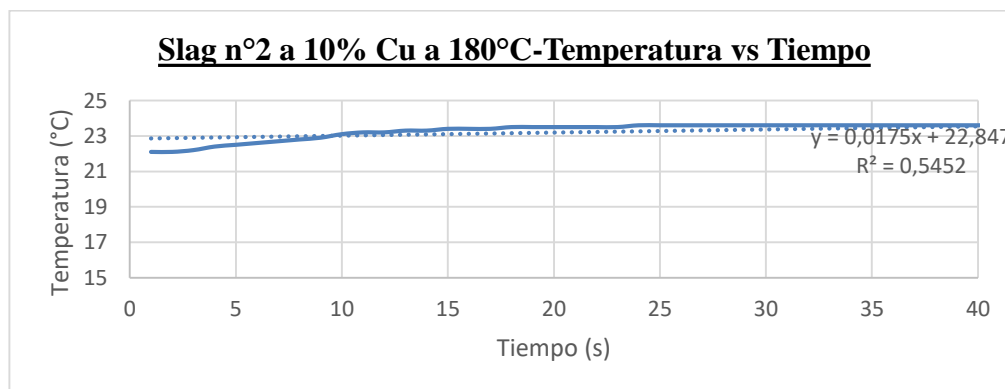


Gráfico 68 Slag n°2 al 10 % de Cu a 180°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 104 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 180°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	343.3
Termómetro	16.6
Bomba	107.6
Granalla	82.7

Tabla 105 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 180°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	22.7
Temperatura final H2O	24.5
Temperatura inicial Granalla	180
Temperatura final Granalla	24.5

Tabla 106 Datos Experimentales de prueba n°3 a 180°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.75
DH vap	404.7
G cal	0

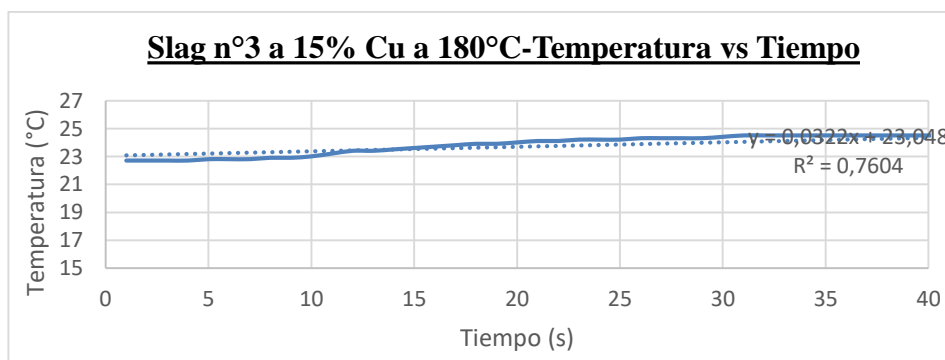


Gráfico 69 Slag n°3 al 15 % de Cu a 180°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 107 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 180°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	342.4
Termómetro	16.6
Bomba	107.6
Granalla	82.7

Tabla 108 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 180°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	23.5
Temperatura final H2O	24.9
Temperatura inicial Granalla	180
Temperatura final Granalla	24.9

Tabla 109 Datos Experimentales de prueba n°4 a 180°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.75
DH vap	404.7
G cal	0

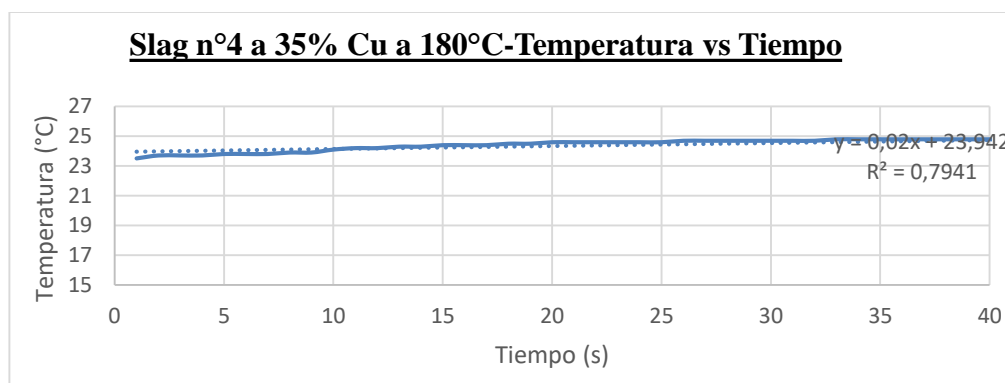


Gráfico 70 Slag n°4 al 35 % de Cu a 180°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 110 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 180°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	344.1
Termómetro	16.6
Bomba	107.4
Granalla	82.7

Tabla 111 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 180°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	23.9
Temperatura final H2O	25.4
Temperatura inicial Granalla	180
Temperatura final Granalla	25.4

Tabla 112 Datos Experimentales de prueba n°5 a 180°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.75
DH vap	404.7
G cal	0

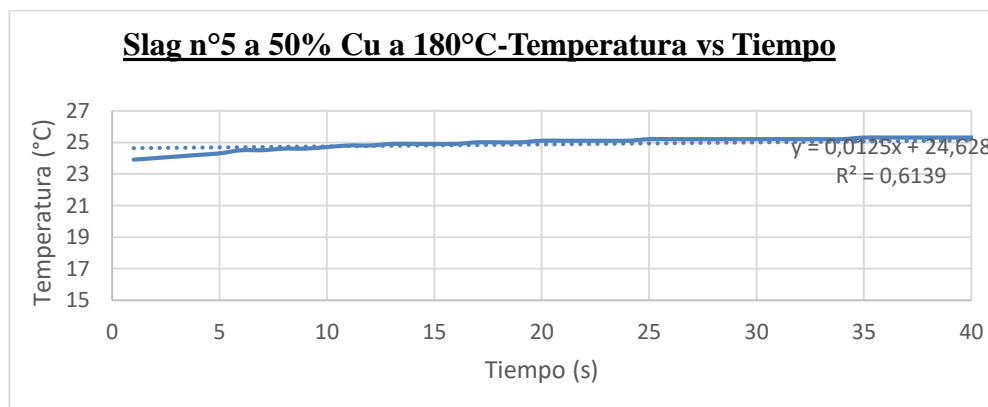


Gráfico 71 Slag n°5 al 50 % de Cu a 180°C- Temperatura vs Tiempo

VIII. Anexo n°8 Datos experimentales de temperatura de 160°C

Temperatura de estudio es 160°C y 82.7 gr de especie

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 113 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 160°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	340.8
Termómetro	16.6
Bomba	106.9
Granalla	82.7

Tabla 114 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 160°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	15
Temperatura final H2O	16.4
Temperatura inicial Granalla	160
Temperatura final Granalla	16.4

Tabla 115 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 160°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.5
DH vap	269.8
G cal	0

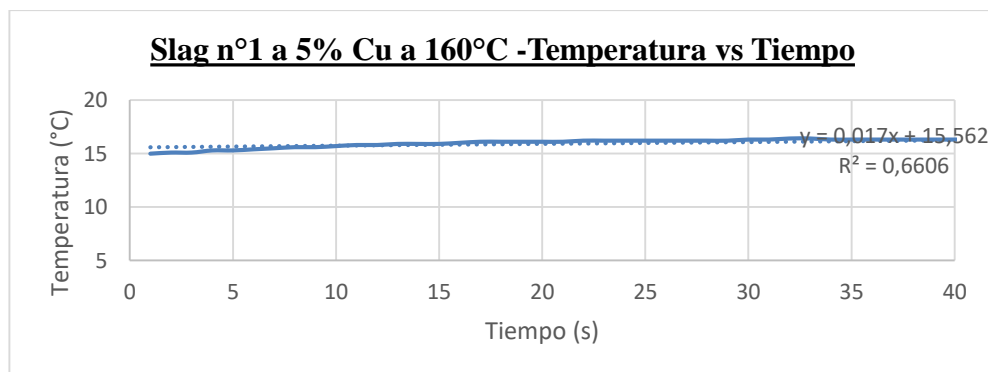


Gráfico 72 Slag n°1 al 5% de Cu a 160°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 116 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 160°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	340.9
Termómetro	16.6
Bomba	107.4
Granalla	82.7

Tabla 117 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 160°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	16.7
Temperatura final H2O	18.1
Temperatura inicial Granalla	160
Temperatura final Granalla	18.1

Tabla 118 Datos Experimentales de prueba n°2 a 160°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.5
DH vap	269.8
G cal	0

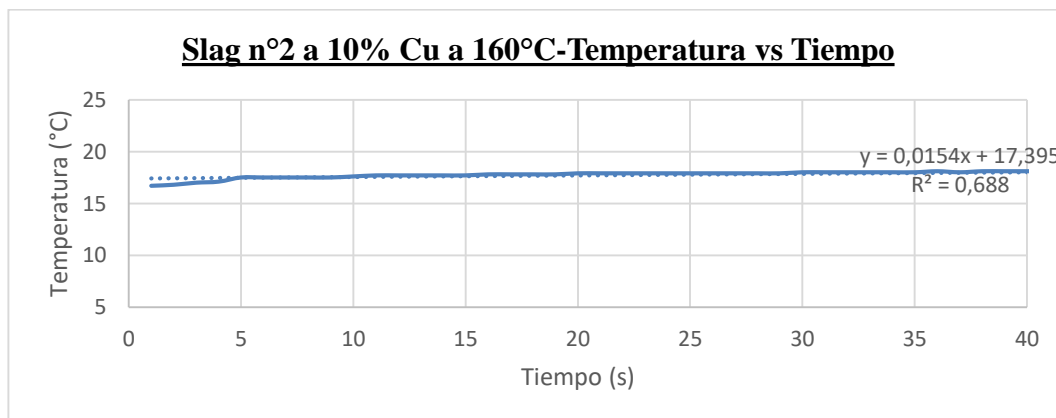


Gráfico 73 Slag n°2 al 10 % de Cu a 160°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 119 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 160°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.4
Calorímetro	341.6
Termómetro	16.6
Bomba	107.4
Granalla	82.7

Tabla 120 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 160°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	18
Temperatura final H2O	19.5
Temperatura inicial Granalla	160
Temperatura final Granalla	19.5

Tabla 121 Datos Experimentales de prueba n°3 a 160°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.5
DH vap	269.8
G cal	0

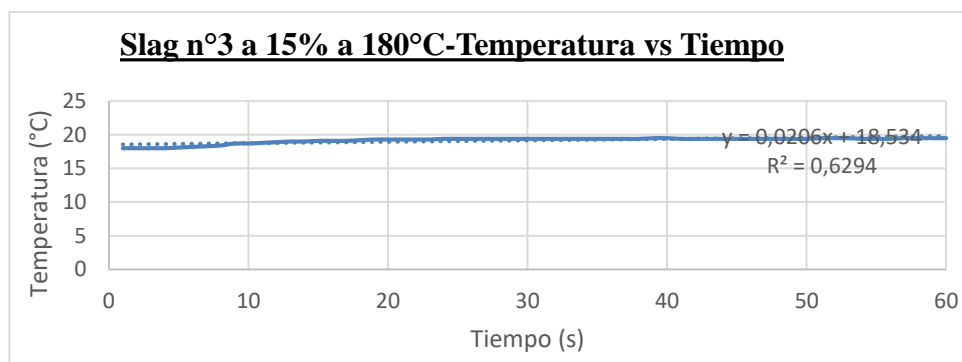


Gráfico 74 Slag n°3 al 15 % de Cu a 160°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 122 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 160°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.5
Calorímetro	341.9
Termómetro	16.6
Bomba	107.4
Granalla	82.7

Tabla 123 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 160°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	19.3
Temperatura final H2O	20.6
Temperatura inicial Granalla	160
Temperatura final Granalla	20.6

Tabla 124 Datos Experimentales de prueba n°4 a 160°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.5
DH vap	269.8
G cal	0

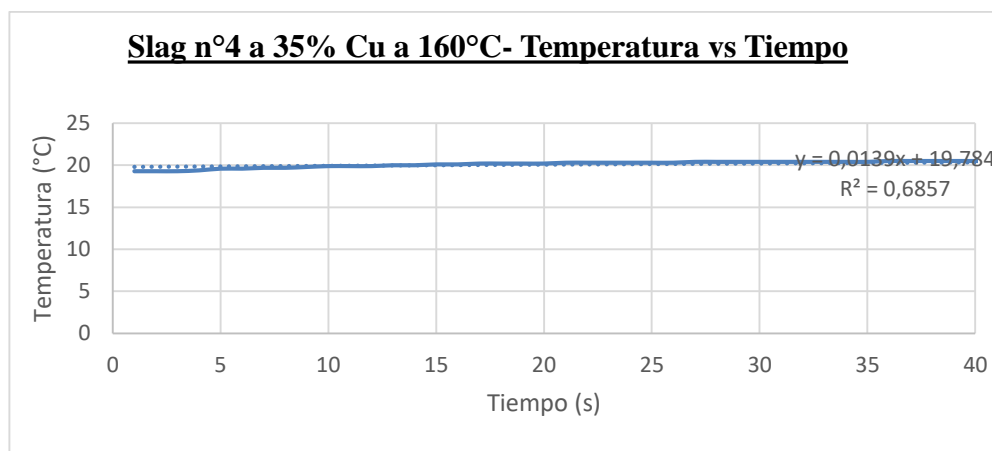


Gráfico 75 Slag n°4 al 35 % de Cu a 160°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 125 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 160°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.5
Calorímetro	341.9
Termómetro	16.6
Bomba	107.6
Granalla	82.7

Tabla 126 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 160°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	20.2
Temperatura final H2O	21.5
Temperatura inicial Granalla	160
Temperatura final Granalla	21.6

Tabla 127 Datos Experimentales de prueba n°5 a 160°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.5
DH vap	269.8
G cal	0

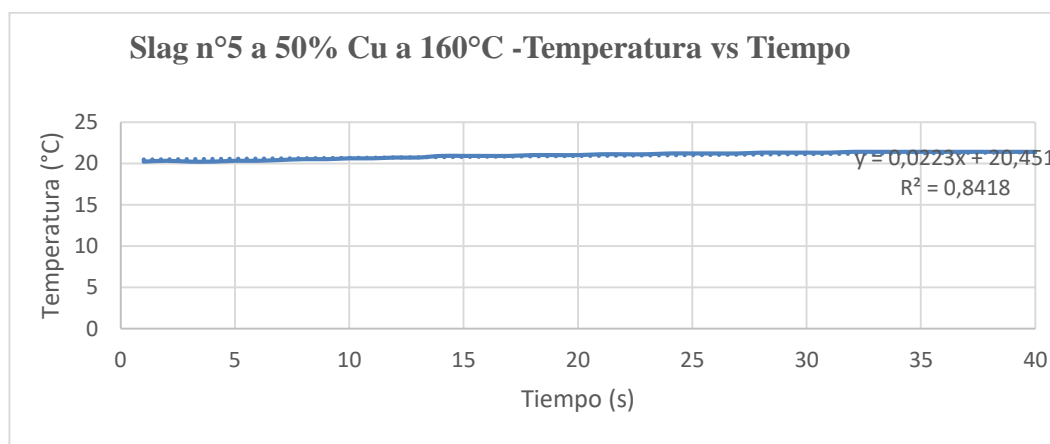


Gráfico 76 Slag n°5 al 50 % de Cu a 300°C- Temperatura vs Tiempo

IX. Anexo n°9 Datos experimentales de temperatura de 130°C

Temperatura de estudio es 130°C y 82.7 gr de especie
Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 128 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 130°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	342.1
Termómetro	16.6
Bomba	106.9
Granalla	82.7

Tabla 129 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 130°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	14.9
Temperatura final H2O	16.3
Temperatura inicial Granalla	130
Temperatura final Granalla	16.3

Tabla 130 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 130°C

Datos	
Agua	1500 ml
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.25
DH vap	134.9
G cal	0

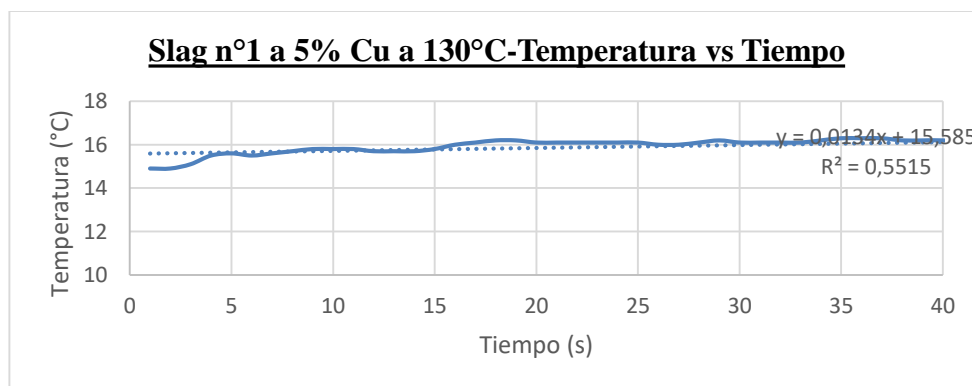


Gráfico 77 Slag n°1 al 5% de Cu a 130°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 131 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 130°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.5
Calorímetro	344.9
Termómetro	16.6
Bomba	107.1
Granalla	82.7

Tabla 132 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 130°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	16.7
Temperatura final H2O	17.9
Temperatura inicial Granalla	130
Temperatura final Granalla	17.9

Tabla 133 Datos Experimentales de prueba n°2 a 130°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.5
DH vap	134.9
G cal	0

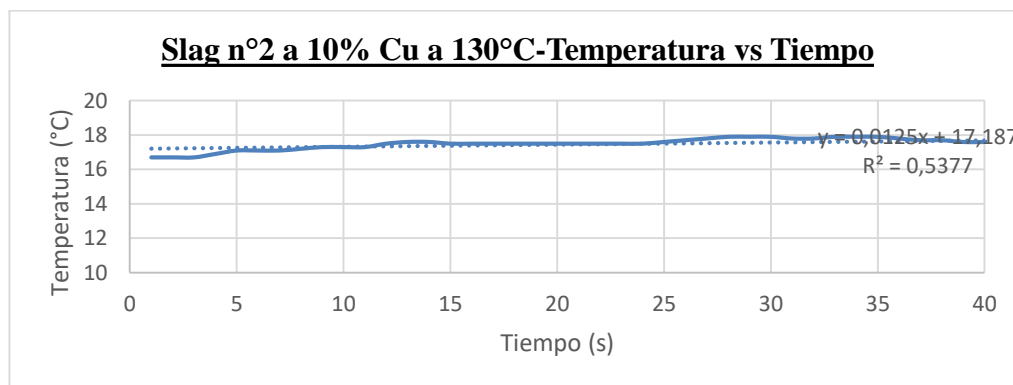


Gráfico 80 Slag n°2 al 10 % de Cu a 130°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 134 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 130°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	345.1
Termómetro	16.6
Bomba	107.9
Granalla	82.7

Tabla 135 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 130°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	17.9
Temperatura final H2O	19
Temperatura inicial Granalla	130
Temperatura final Granalla	19.1

Tabla 136 Datos Experimentales de prueba n°3 a 130°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.5
DH vap	134.9
G cal	0

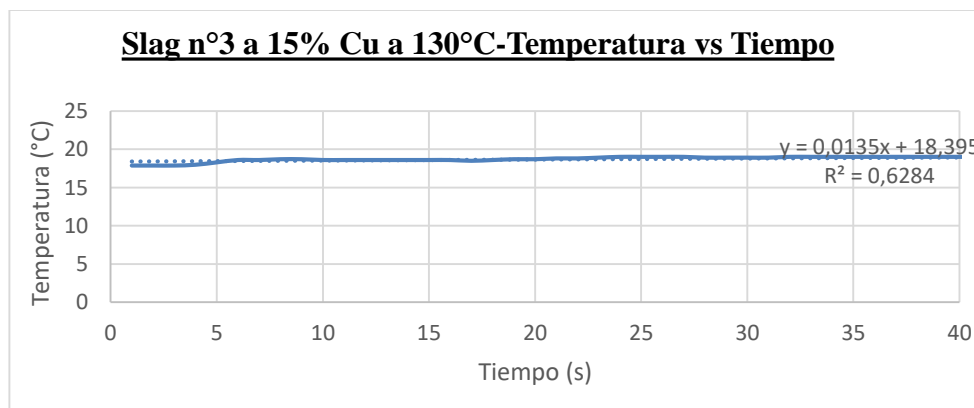


Gráfico 81 Slag n°3 al 15 % de Cu a 130°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 137 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 130°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.5
Calorímetro	345.4
Termómetro	16.6
Bomba	107
Granalla	82.7

Tabla 138 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 130°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	19.4
Temperatura final H2O	20.7
Temperatura inicial Granalla	130
Temperatura final Granalla	20.7

Tabla 139 Datos Experimentales de prueba n°4 a 130°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.25
DH vap	134.9
G cal	0

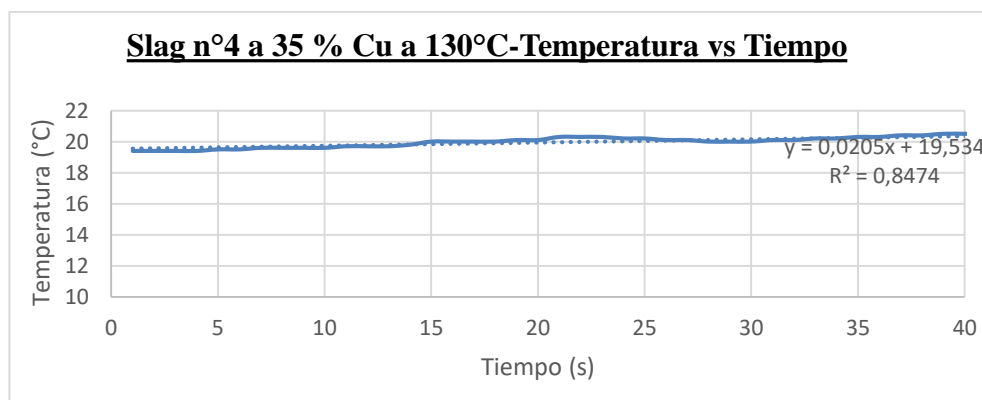


Gráfico 82 Slag n°4 al 35 % de Cu a 130°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 140 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 130°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.5
Calorímetro	345.1
Termómetro	16.6
Bomba	106.9
Granalla	82.7

Tabla 141 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 130°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	20.9
Temperatura final H2O	22
Temperatura inicial Granalla	130
Temperatura final Granalla	22

Tabla 142 Datos Experimentales de prueba n°5 a 130°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0.25
DH vap	134.9
G cal	0

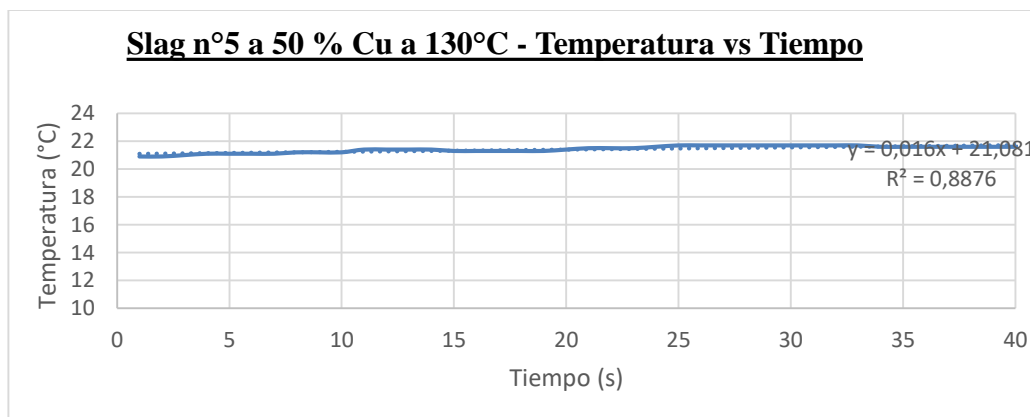


Gráfico 83 Slag n°5 al 50 % de Cu a 130°C- Temperatura vs Tiempo

X. Anexo n°10 Datos experimentales de temperatura de 80°C

Temperatura de estudio es 80 °C y 82.7 gr de especie

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 143 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 80°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	340.3
Termómetro	16.7
Bomba	106.8
Granalla	82.7

Tabla 144 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 80°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	15.4
Temperatura final H2O	16.4
Temperatura inicial Granalla	80
Temperatura final Granalla	16.2

Tabla 145 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 80°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0
DH vap	0
G cal	0

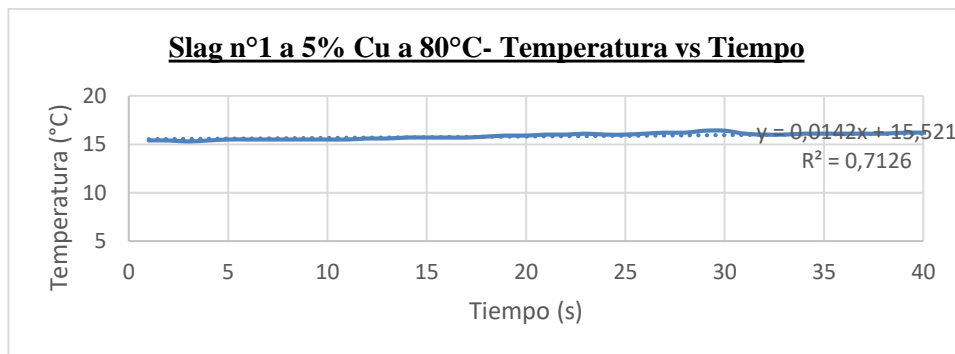


Gráfico 84 Slag n°1 al 5% de Cu a 80°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 146 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 80°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.6
Calorímetro	340.8
Termómetro	16.7
Bomba	108
Granalla	82.7

Tabla 147 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 80°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	17.7
Temperatura final H2O	18.6
Temperatura inicial Granalla	80
Temperatura final Granalla	18.6

Tabla 148 Datos Experimentales de prueba n°2 a 80°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0
DH vap	0
G cal	0

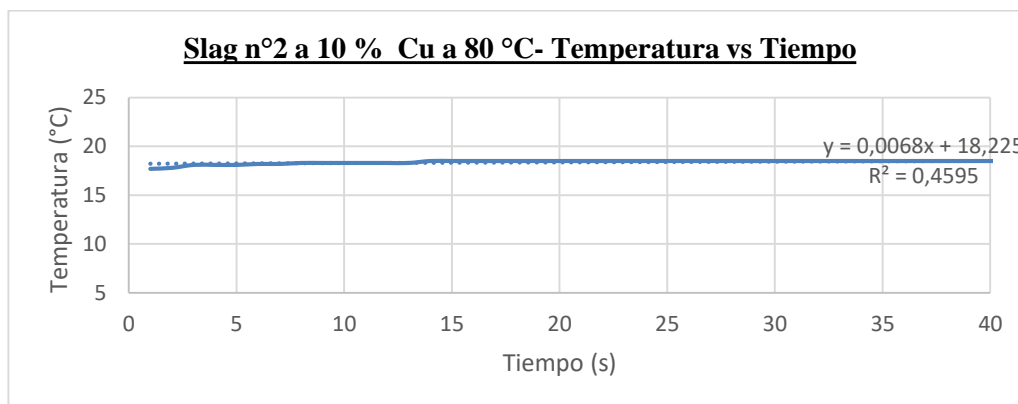


Gráfico 87 Slag n°2 al 10 % de Cu a 80°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 149 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 80°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	434
Calorímetro	341
Termómetro	16.7
Bomba	107.5
Granalla	82.7

Tabla 150 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 80°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	19.6
Temperatura final H2O	20.5
Temperatura inicial Granalla	80
Temperatura final Granalla	20.5

Tabla 151 Datos Experimentales de prueba n°3 a 80°C

Datos	
Agua	1500 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0
DH vap	0
G cal	0

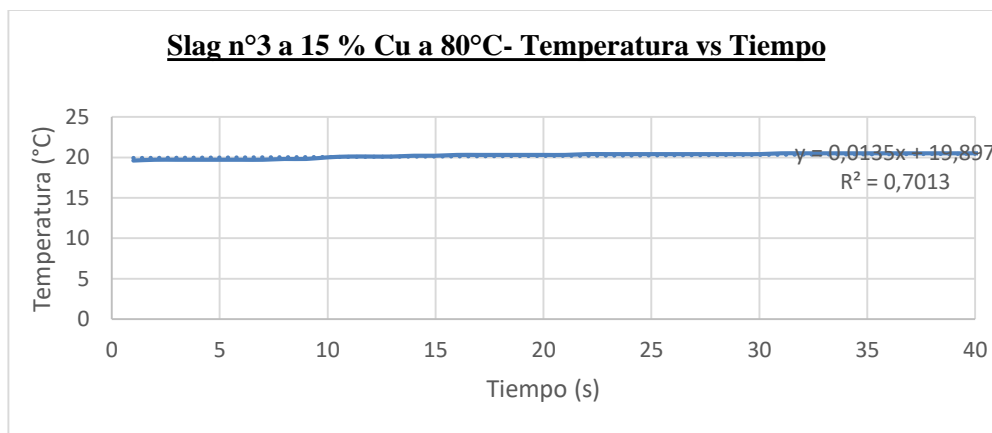


Gráfico 88 Slag n°3 al 15 % de Cu a 80°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 152 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 80°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.5
Calorímetro	340.6
Termómetro	16.7
Bomba	107.1
Granalla	82.7

Tabla 153 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 80°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	20.8
Temperatura final H2O	21.7
Temperatura inicial Granalla	80
Temperatura final Granalla	21.7

Tabla 154 Datos Experimentales de prueba n°4 a 80°C

Datos	
Agua	1500,4 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0
DH vap	0
G cal	0

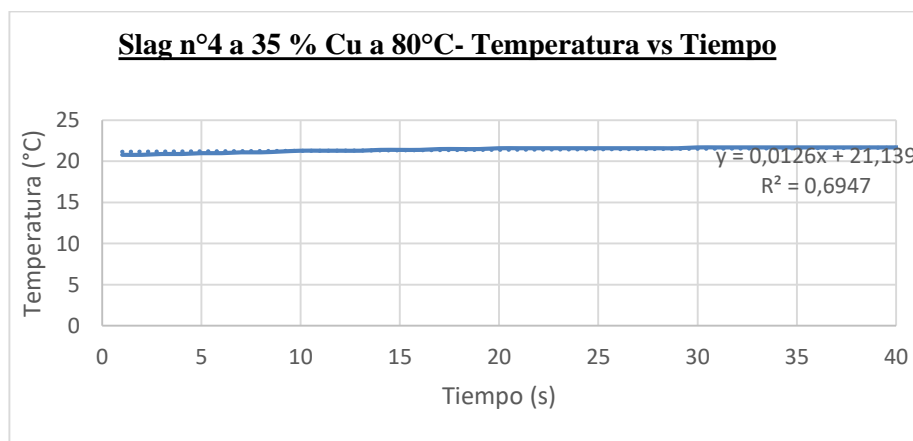


Gráfico 89 Slag n°4 al 35 % de Cu a 80°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 155 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 80°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.5
Calorímetro	342.6
Termómetro	16.7
Bomba	107.1
Granalla	82.7

Tabla 156 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 80°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	21.8
Temperatura final H2O	22.7
Temperatura inicial Granalla	80
Temperatura final Granalla	22.7

Tabla 157 Datos Experimentales de prueba n°5 a 80°C

Datos	
Agua	1500.1 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0
DH vap	0
G cal	0

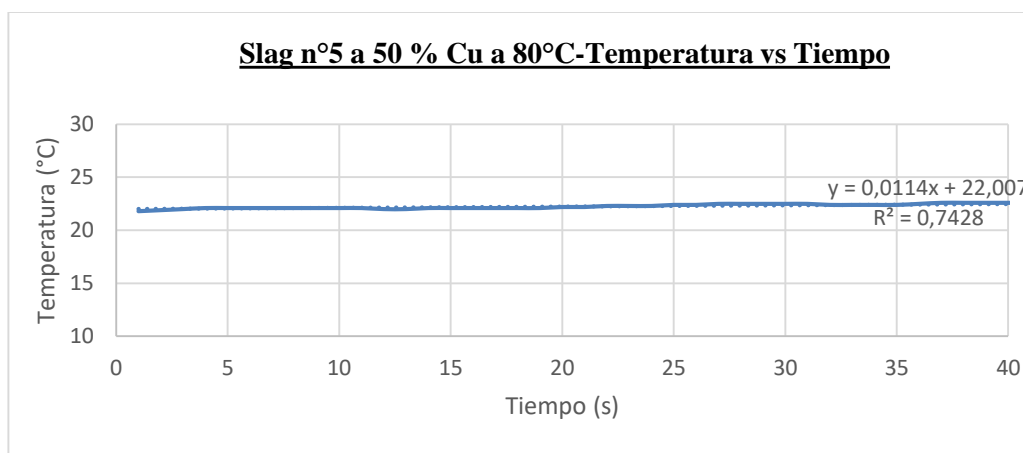


Gráfico 90 Slag n°5 al 50 % de Cu a 80°C- Temperatura vs Tiempo

Anexo n°11 Datos experimentales de temperatura de 60°C

Temperatura de estudio es 60 °C y 82.7 gr de especie

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°1 al 5% Cu

Tabla 158 Masa de instrumentos para la prueba experimental n°1 a 60°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	341
Termómetro	16.6
Bomba	107.3
Granalla	82.7

Tabla 159 Temperaturas experimentales de prueba n°1 a 60°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	17.7
Temperatura final H2O	18.4
Temperatura inicial Granalla	65
Temperatura final Granalla	18.4

Tabla 160 Tabla de Datos Experimentales de prueba n°1 a 60°C

Datos	
Agua	1500.9 ml
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0
DH vap	0
G cal	0

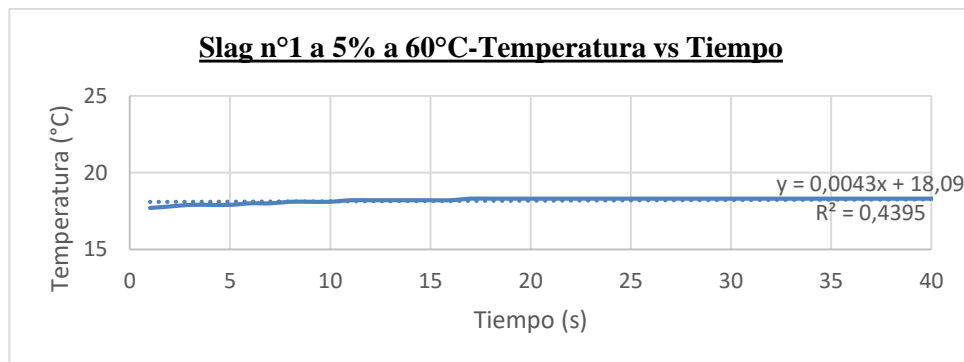


Gráfico 91 Slag n°1 al 5% de Cu a 60°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°2 al 10% Cu

Tabla 161 Masa de instrumentos para la prueba n°2 a 60°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	340.8
Termómetro	16.6
Bomba	107.1
Granalla	82.7

Tabla 162 Temperaturas experimentales de prueba n°2 a 60°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	14.1
Temperatura final H2O	14.8
Temperatura inicial Granalla	60
Temperatura final Granalla	14.8

Tabla 163 Datos Experimentales de prueba n°2 a 60°C

Datos	
Agua	1504 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0
DH vap	0
G cal	0

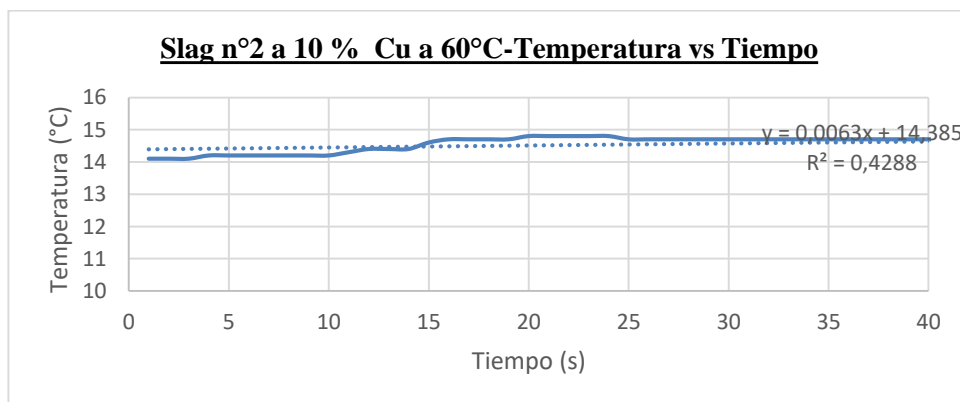


Gráfico 93 Slag n°2 al 10 % de Cu a 60°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°3 al 15 % Cu

Tabla 164 Masa de instrumentos para la prueba n°3 a 60°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	341.3
Termómetro	16.6
Bomba	107.6
Granalla	82.7

Tabla 165 Temperaturas experimentales de prueba n°3 a 60°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	15
Temperatura final H2O	15.6
Temperatura inicial Granalla	65
Temperatura final Granalla	15.6

Tabla 166 Datos Experimentales de prueba n°3 a 60°C

Datos	
Agua	1526.7 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0
DH vap	0
G cal	0

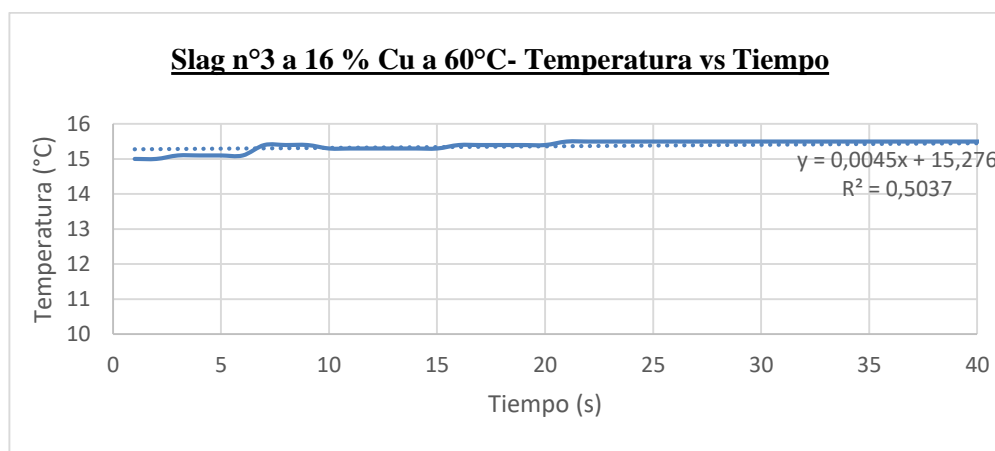


Gráfico 94 Slag n°3 al 15 % de Cu a 60°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°4 al 35 % Cu

Tabla 167 Masa de instrumentos para la prueba n°4 a 60°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	341.7
Termómetro	16.6
Bomba	107.6
Granalla	82.7

Tabla 168 Temperaturas experimentales de prueba n°4 a 60°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	16
Temperatura final H2O	16.6
Temperatura inicial Granalla	65
Temperatura final Granalla	16.6

Tabla 169 Datos Experimentales de prueba n°4 a 60°C

Datos	
Agua	1523,4 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0
DH vap	0
G cal	0

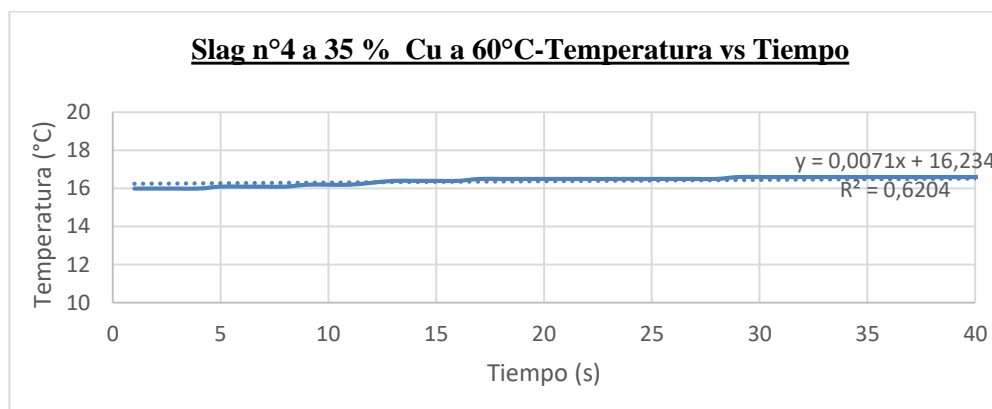


Gráfico 95 Slag n°4 al 35 % de Cu a 60°C- Temperatura vs Tiempo

Muestra de Granalla de escoria de cobre n°5 al 50 % Cu

Tabla 170 Masa de instrumentos para la prueba n°5 a 60°C

Datos	Masa (gr)
Vaso precipitado	433.7
Calorímetro	342.5
Termómetro	16.6
Bomba	107.8
Granalla	82.7

Tabla 171 Temperaturas experimentales de prueba n°5 a 60°C

Datos	Temperatura (°C)
Temperatura inicial H2O	16.9
Temperatura final H2O	17.5
Temperatura inicial Granalla	65
Temperatura final Granalla	17.5

Tabla 172 Datos Experimentales de prueba n°5 a 60°C

Datos	
Agua	1500.9 mL
Cp. agua	1 c[cal/g°C]
Evaporación	0
DH vap	0
G cal	0

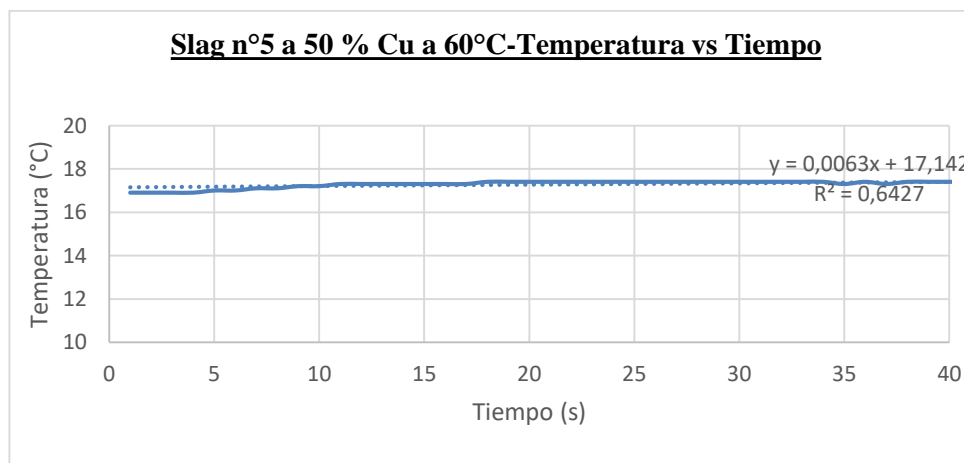


Gráfico 96 Slag n°5 al 50 % de Cu a 60°C- Temperatura vs Tiempo

XI. Artículo en publicación

Elsevier Editorial System(tm) for Chemical
Engineering Research and Design

Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: Copper slag heat capacity thermodynamic model from low to
high temperatures and several percentages of Copper

Article Type: Full Length Article

Section/Category: Heat and Mass Transfer

Keywords: energy
recovery smelt
copper slag heat
capacity high
temperature

Corresponding Author: Professor Sergio Roberto Rivera, Ph.D.,
M.Sc., Chemical Engineer

Corresponding Author's Institution: CIEGMM-UNAB

First Author: Sergio Roberto Rivera, Ph.D., M.Sc., Chemical
Engineer

Order of Authors: Sergio Roberto Rivera, Ph.D., M.Sc., Chemical
Engineer; Natalia Cepeda; Vannia Torres

Abstract: The smelting of copper concentrate for copper production is a well know pyro metallurgical process. Only in Chile more than 28 million metric tons of copper concentrate each year end like molten copper (anodes), then finally purified to cathodic Copper with 99,99 percent of pure copper. The molten process in simple word is to dry copper's concentrate, and after that feed it into a big industrial vessel. The special thing of all this process is the fact that this furnace does not use external energy (but only when operation start), the internal energy of the copper's concentrate is liberated and the smelt happens. The smelt of this material is an exothermically reaction. In the molten bath there are two phases. One with higher density is almost only copper while the

other is rich in iron, but still to have a low copper percentage. Of course, all attention is over the copper phase, because it is the business, the money, so nobody worries about the second phase called copper Slag. The copper Slag became a problem because it is almost three times the copper phase mass and must be rejected with 1300 to 1400 °C. it is necessary to recover all the energy of slag, but there is almost no thermodynamic information related to slag. If one wants to calculate an energy recovery process by using the smelt slag, heat capacity at high and low temperature is required, and it is not available. It is the reason why our research centre decided to develop a thermodynamical model for Copper slag heat capacity.

Suggested Reviewers: Kim Dam-Johanson Ph.D. head master,
Kemiteknik Institute, Danish Technical University
KDS@kt.dtu.dk
Kemiteknik has knowledge of smelt metals, high temperature.

Yu Quingbo Ph.D.
School of Materials and Metallurgy, Northeastern University,
yuqb@smm.neu.edu.cn
Quingbo has several papers working with slag, and is maybe is the most similar to my own work. I think we have the same idea, and we are looking for the same final solution.

Darcy Fuenzalida O'Shee Dr. head
master, Universidad Federico Santa
maría dgc@usm.cl
He is chemical Engineer, and last year got a prize for original idea, to recover energy from slag, I guess he must have expertice in this field.

Kanjanabha bhattacharyya
head of sales, metals, energy and water, Outotek
Kanjanabha.bhattacharyya@outotec.com
Outotek is a company with a lot of expertice in molten, and smelting process, Kanjanabha is the head of bussisness, must be expert in smelting products.

Copper slag heat capacity thermodynamic model from low to high temperatures and several percentages of Copper

Natalia Cepeda, Vannia Torres, Sergio Roberto Rivera*

CIEGMM (Geo Mine and Metallurgical Research Centre), Civil Mine Engineer, Engineering Faculty, UNAB, Chile.

[*sergio.rivera@unab.cl](mailto:sergio.rivera@unab.cl)

Abstract

The smelting of copper concentrate for copper production is a well known pyrometallurgical process. Only in Chile more than 28 million metric tons of copper concentrate each year end like molten copper (anodes), then finally purified to cathodic Copper with 99,99 percent of pure copper. The molten process in simple word is to dry copper's concentrate, and after that feed it into a big industrial vessel. The special thing of all this process is the fact that this furnace does not use external energy (but only when operation start), the internal energy of the copper's concentrate is liberated and the smelt happens. The smelt of this material is an exothermically reaction. In the molten bath there are two phases. One with higher density is almost only copper while the other is rich in iron, but still to have a low copper percentage. Of course, all attention is over the copper phase, because it is the business, the money, so nobody worries about the second phase called copper Slag. The copper Slag became a problem because it is almost three times the copper phase mass and must be rejected with 1300 to 1400 °C. it is necessary to recover all the energy of slag, but there is almost no thermodynamic information related to slag. If one wants to calculate an energy recovery process by using the smelt slag, heat capacity at high and low temperature is required, and it is not available. It is the reason why our research centre decided to develop a thermodynamical model for Copper slag heat capacity.

Keywords: energy recovery, smelt copper slag, heat capacity, high temperature

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

1- Pyrometalurgic copper recovery process

A review of copper pyrometallurgical practice over the world on year 2003 is up-dated in a great work for consult and for getting a landscape view of pyrometallurgy and size of this great industry ⁽¹⁾.

The pyrometallurgical processing of copper varies worldwide depending on the feed material, and differences can be found on process, operating parameters, and physical shape, size, and orientation of the vessel. The pyrometallurgical processing of Copper can be divided on smelting and converting process. After this an electrorefining process is necessary before to have commercial pure copper. electrorefining is not considered into this paper. The smelt process produce to phases, mate (rich in Copper) and slag (poor in Copper). Moskalyk and Alfantazi⁽¹⁾ reported 41 copper smelters in China and 11 of those in Chile. Cao, Li, Wang and Liu⁽²⁾ announced a production of 7,67 million tons of refined copper in China, equivalent to a production of more than 15 million ton of copper smelting slags per year. In Chile, Sanchez, Parada, Parra, Marquez, Jara, Carrasco and Palacios⁽³⁾ reported a production of 1,52 millions of refined Copper, equivalent to a production of 11,75 million ton of copper smelting slags per year.

The pyrometallurgical copper smelting process is quite expensive, and especially when the copper price goes down all the economical mine world worry and became to see around what can one do to get down the operation cost, what could become a secondary product, that is the question. So, since long time ago, many researchers around the world are looking for making copper smelting slags into a secondary product, or getting secondary products from this. There are many papers related to how copper smelting slag could be uses as a part of construction materials. Here a few named references: Recovery of metal values from copper slag and reuse of residual secondary slag⁽⁴⁾, Modifying hot slag and converting it into value-added materials: a review⁽⁵⁾ which is a very good reference source, Characterization and recovery of copper values from discarded slag⁽⁶⁾. There is one paper more, but this paper goes further, and the authors show physicochemical characterization of copper slag and then go to suggest what could be done with slags. This paper is physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management⁽⁷⁾. From our point of view, the best way to get improvement back from slags include an energy recovery way, and it means, we need thermodynamic slag information. Which slags information? For thermodynamic and energy study there are two main properties: heat capacity and latent enthalpy (in case of phase change, in

here there is not needness). However, the main thermodynamic or physicochemical properties are missed. For example, let see Sanchez et al.⁽³⁾, show a table named Physical and mechanical properties of a typical copper slag (which is at the same time referenced from Gorai and Jana⁽⁸⁾). In this table absorption, bulk density, conductivity, harness, unit weight, moisture, abrasion loss, internal friction angle are reported, but no heat capacity is included along all those papers.

2- Copper slag thermodynamic information

Few years ago, on 2009, working for SKM engineering company, S. Rivera⁹ suggest a process for recovering energy from molten slag and producing electrical energy. A team of ten specialists of several disciplines work out the idea, and nevertheless, the result of this first attempt was positive, no thermodynamic enough information was available, and without stronger results, the develop stop. After that later on 2011, working for Codelco El Salvador, S. Rivera¹⁰, shown the idea to Codelco (Chilean Copper company), the authorities ask for stronger numbers, but without thermodynamic information impossible to show hard numbers, impossible to make up an energy balance.

Particularly, our interest on energy balance is from 800 °C going down until 180 °C. When slag has 800 °C degree of temperature the slag is already solid, and still solid when it has 180 °C degree, and no phase change happened. The slag coming from de furnace has 1350 °C, but it is not our interest to know heat capacity on the range of temperature 1350-800 Celsius degree, because it is mechanically not possible yet to recover energy on this range of temperature. But on the temperatures range 800-180 Celsius degree it is possible. That is the reason why the range of temperatures 800-180 °C define the range of heat capacity measurement done in this work. The experimental work of this paper will be the base of an energy evaluation to clarify how much energy could be recuperated from copper smelting slag from 800 °C to 180 °C. It will be in an after paper, leaving in this paper only the experimental data and the numeric treatment of experimental data, and a model for calculation of copper smelting slags for several percentage of copper and many temperatures between 800 °C and 180 °C.

3- Description of the heat capacity experimental measurements

Calorimeter of 2300 cubic centimetres with internal recirculation of water and temperature detector has been used for all the measurements. The samples of few mass are externally fixed to a defined temperature and then added quickly into the calorimeter bath. The mass of water inside the calorimeter at the beginning and end are detected, as well as all the temperature since the experiment go on. To insure data, all parts of the calorimeters are checked on mass at the beginning and at the end. The experimental researchers have been trained once and over, so they do it almost like automates.

The experiment included five samples of copper smelting slags, all of those content small and similar size particles (like granulated material). The amount of copper in those are 5, 10, 15, 35 and 50 % of Copper. The temperatures are 180, 300, 400, 500, 600, 700 and 800 °C. The amount of mass of each one of the experiments is 12 grams.

4- Experimental data

In Table 1, the experimental data are shown.

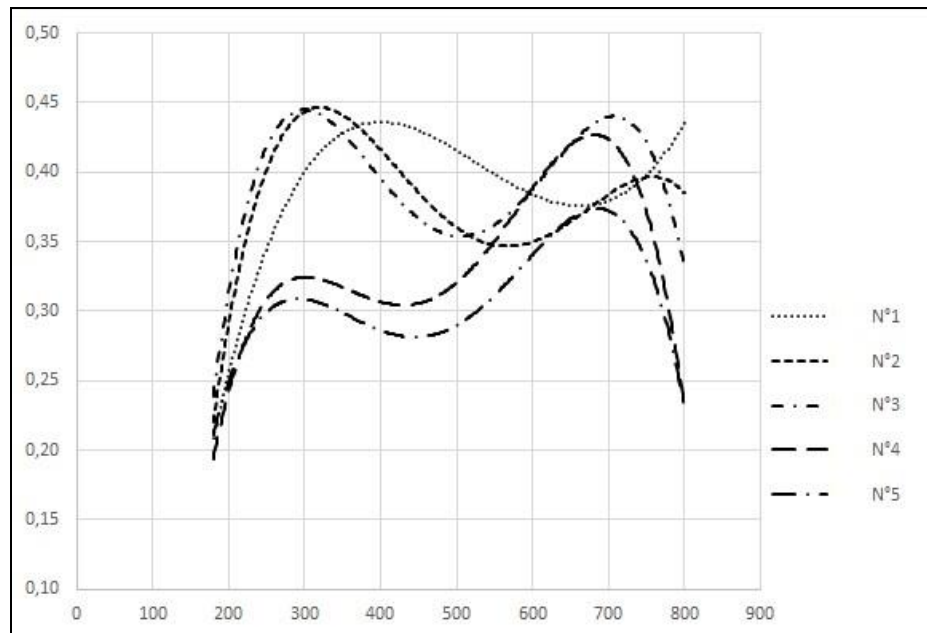
Slag N°1	5% Cu	Slag N°2	10% Cu	Slag N°3	15% Cu
T(°C)	Cp (cal/g °C)	T(°C)	Cp (cal/g °C)	T(°C)	Cp (cal/g °C)
800	0,44074	800	0,38710	800	0,32628
700	0,35876	700	0,37780	700	0,45361
600	0,41305	600	0,34914	600	0,37027
500	0,40738	500	0,38165	500	0,35570
400	0,42027	400	0,38545	400	0,40995
300	0,41387	300	0,46032	300	0,43390
180	0,20568	180	0,21684	180	0,24143

Slag N°4	35% Cu	Slag N°5	50% Cu
T(°C)	Cp (cal/g °C)	T(°C)	Cp (cal/g °C)
800	0,21876	800	0,23397
700	0,47193	700	0,35988
600	0,29735	600	0,35089
500	0,40234	500	0,30363
400	0,27457	400	0,25627
300	0,32614	300	0,32684
180	0,19527	180	0,20763

Table 1: experimental data, several slags, several copper % and several temperatures

5- Discussion

The Plot 1 shown all the data plotted directly without any filter. Under a first very early view, it is possible to understand that from 800 °C to 60°C there are strong variation of Cp values, and zone can be identified. So, there is a zone of low temperature, a short one, let say under 300 °C, and other over 700 °C. What we did, it was to try several options, and an acceptable model come up.



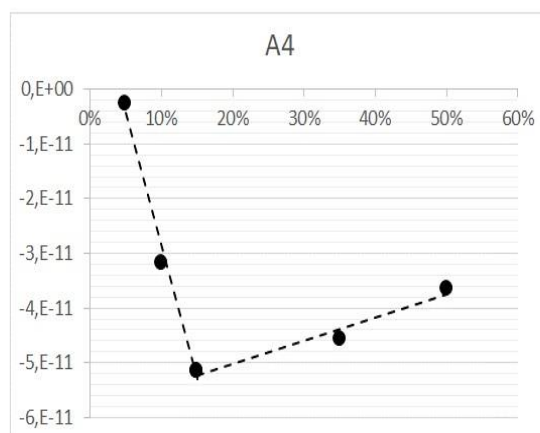
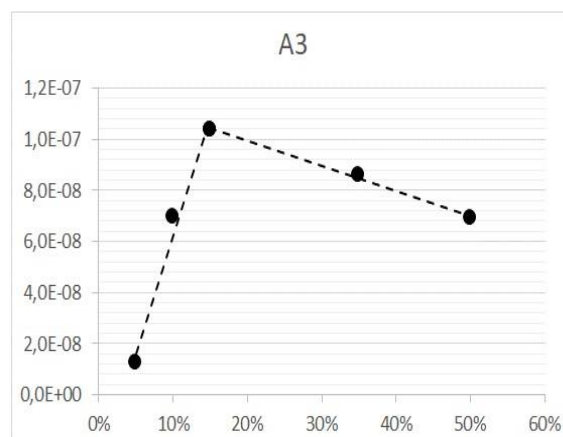
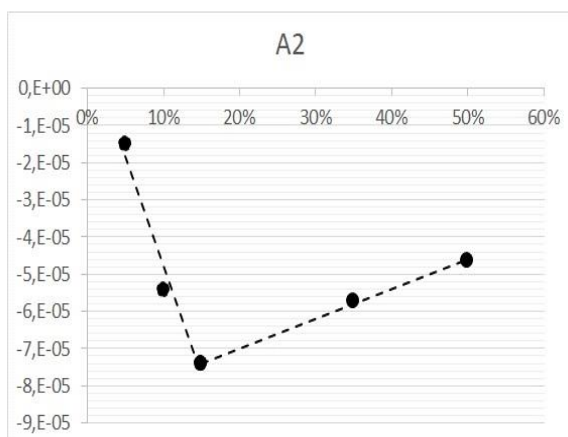
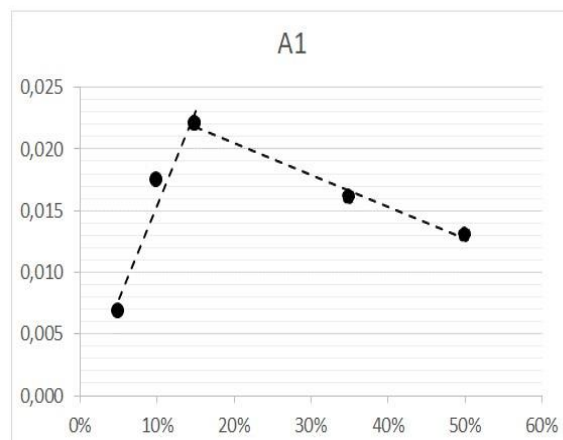
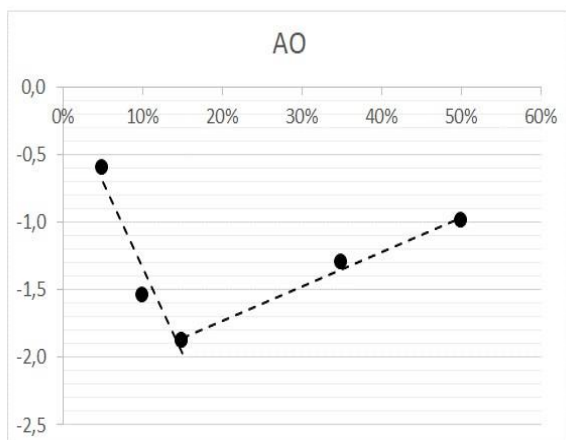
Plot 1: all the slags and all temperatures (X axis temperature (°C), Y axis Cp (g/cal °C)).

The experimental data behave like a polynomial four-degree equation with temperature as the variable. A set of five polynomial equations come up from the five adjusted experimental data. On Table two all the polynomial parameters A_0 , A_1 , A_2 , A_3 , and A_4 .

	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5
% Cu	5,00000E-02	1,00000E-01	1,50000E-01	3,50000E-01	5,00000E-01
A0	-5,98476E-01	-1,54086E+00	-1,87471E+00	-1,30070E+00	-9,91958E-01
A1	6,81811E-03	1,74700E-02	2,20278E-02	1,60906E-02	1,29977E-02
A2	-1,51167E-05	-5,42234E-05	-7,41358E-05	-5,72499E-05	-4,63611E-05
A3	1,24259E-08	6,96582E-08	1,03715E-07	8,59387E-08	6,92445E-08
A4	-2,70439E-12	-3,17679E-11	-5,14475E-11	-4,56630E-11	-3,65180E-11

Table 2: polynomial four-degree parameters. This parameter's values come up when experimental data from 180 °C to 800°C are fixed by a four-degree polynomial equation

Now, for each one of the parameters there are five couple of data parameter and percentage of copper, so the relation between parameter and percentage of copper could be found.



Plot 2: axis X is percentage of copper and axis Y is the parameter value. One plot for each parameter.

Plot 2 shown clearly that there are two linear behaviour with a strong linear behave, and with a break point on percentage of copper when it is 15%. That because two range of copper percentage must be taken in mind once one wish to create a model for Cp prediction. From 0 to 15 percent, and from 15 to 50 percent.

6- The thermodynamic Model

	under 15 %Cu		over 15 %Cu	
	a	b	a	b
A0	-0,06178352	-12,7623296	-2,236105177	2,540950881
A1	0,000228928	0,152097321	0,025708869	-0,026010549
A2	1,11938E-05	-0,000590191	-8,57924E-05	7,96304E-05
A3	-2,93559E-08	9,12888E-07	1,18955E-07	-9,79671E-08
A4	2,01032E-11	-4,87431E-10	-5,8514E-11	4,19135E-11

Table 3: parameter of the linear equations from figures on plot 2. The linear equations shape is $A_x = a + (b \times \%Cu)$ been %Cu the percentage of copper from 0 to 100. There is a zone for low percentage of copper and a zone for high percentage of copper.

On table 3 are the linear parameters for calculation of the polynomial parameters for calculation of Cp. If one has, for example a slag of 8 %Cu, then must use the parameters of under 15%Cu. On the other hand, if one has a copper slag with 26 %Cu must use the parameters of over 15%Cu zone.

The shape of the Cp polynomial equation is as follows:

$$C_p = A_0 + (A_1T) + (A_2T^2) + (A_3T^3) + (A_4T^4)$$

Where

Cp : Heat Capacity of copper slag (cal/g°C)

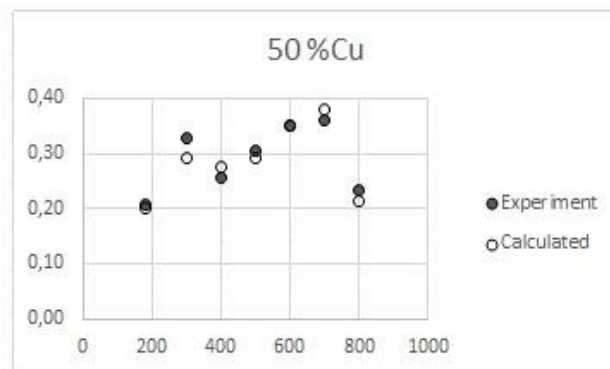
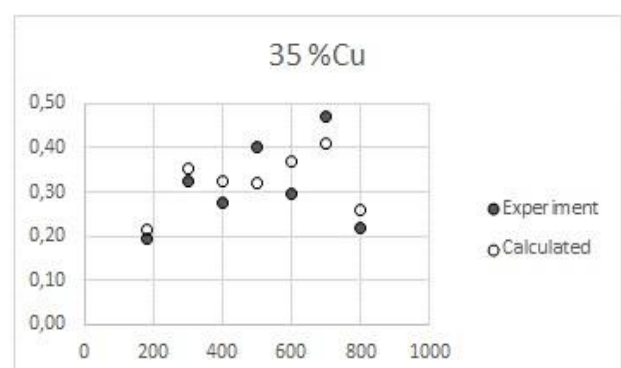
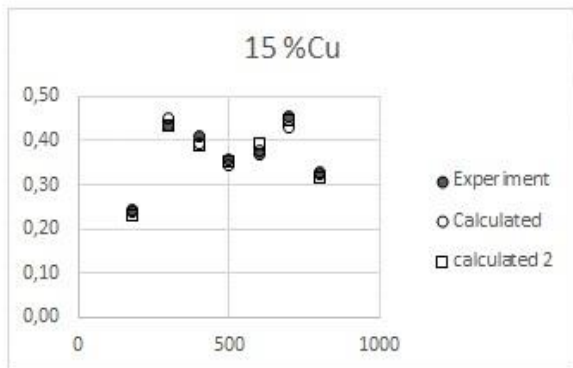
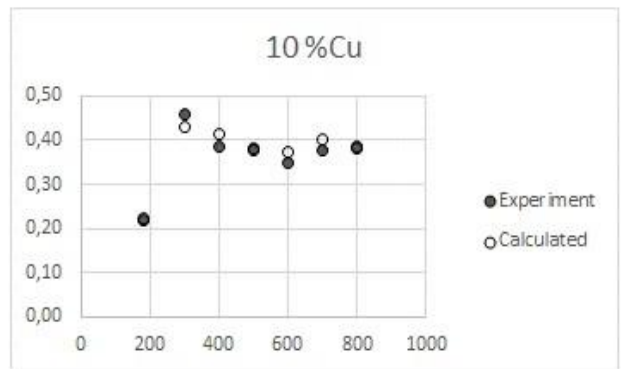
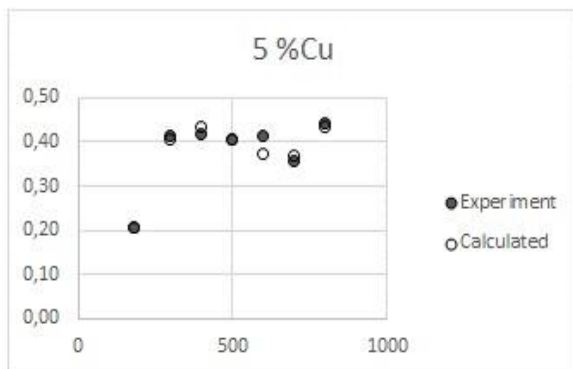
T : Temperature (°C)

Using the parameters on Table 3 and the four-degree polynomial equation, The values of experimental CP could be now calculated.

Results are shown on Table 4 and Plot 5.

Slag N°1	5% Cu		Slag N°2	10% Cu		Slag N°3	15% Cu	15% Cu
T(°C)	Cp (cal/g °C)		T(°C)	Cp (cal/g °C)		T(°C)	Cp (cal/g °C)	Cp (cal/g °C)
800	0,4365		800	0,3835		800	0,3305	0,3172
700	0,3712		700	0,4012		700	0,4313	0,4462
600	0,3719		600	0,3739		600	0,3759	0,3957
500	0,4074		500	0,3766		500	0,3459	0,3550
400	0,4363		400	0,4159		400	0,3956	0,3879
300	0,4071		300	0,4295		300	0,4520	0,4329
180	0,2073		180	0,2225		180	0,2378	0,2309
Slag N°4	35% Cu		Slag N°5	50% Cu				
T(°C)	Cp (cal/g °C)		T(°C)	Cp (cal/g °C)				
800	0,2581		800	0,2138				
700	0,4088		700	0,3808				
600	0,3702		600	0,3511				
500	0,3184		500	0,2910				
400	0,3241		400	0,2762				
300	0,3527		300	0,2925				
180	0,2132		180	0,2000				

Tabla 4: calculated values of Cp at several %Cu and several Temperatures. X axis is temperature (°C) and axis Y is Cp(cal/g°C).



Plot 3: Experimental and calculated Cp. X axis temperature (°C), Y axis Cp (cal/g°C). 5% and 10% calculated by using under 15% parameters of Table 3. 15% calculated by both under and over 15%Cu parameters of Table 3, and 35% and 50% calculated by over

On Plot 3 the experimental and calculated Cp value are shown. Correlation is not so good for 35 %Cu, but it is because the experimental data have a strong resonance, and calculated data in fact try to smooth these differences.

7- Conclusions

The energy will be recovered from molten slag from 800 to 180 °Celsius. What to do from smelting slag (with 1350° Celsius) to solid slag with 800 ° Celsius will be shown on next work. And here the model for calculation of heat capacity for copper smelting slag have been introduced. Now an energy balance of smelted copper slags can be done.

There is a range of temperature, let say, under 180 °C down to 80 °C which should be further explored. We could not do it, because our equipment have been own made, and the zone under 160 Celsius degree shown to be extremely difficult, like it was for 35 % of copper, and you could see the great resonance on experimental data (Plot 3, 35% Copper).

8- References

1. R.R. Moskalyk , A.M. Alfantazi. (2003). *Review of copper pyrometallurgical practice: today and tomorrow*, Minerals Engineering, 16(2003) 893-919.-
2. Hongyang Caoa,b,* , Guojuan Lia, Jimin Wanga, Zhiqiang Liu. *Thermodynamic analysis of separating synchronously copper and iron components from copper smelting slag*, The tenth International conference on waste management and tchnology (ICWMT) Procedia Environmental sciences 31(2016)675-682.-
3. Sanchez, M., Parada, F., Parra, R., Marquez, F., Jara, R., Carrasco, J.C., Palacios, J. *Management of Copper pyrometallurgical slags: giving additional value to copper mining industry*.VII International conference on molten slags fluxes and salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004, 543-550.
4. Prince Sarfo, Avimanyu Das, Gary Wyss, Courtney Youngs, *Recovery of metals values from copper slag and reuse of residual secondary slag*. Waste Management 70(2017) 272-281.
5. Yu Li, Wen-Bin Dai, *modifying hot slag and converting it into value added materials: a review*. Journal of cleaner production 175(2018)176-189.
6. Bisweswar das, Barada kanta Mishra, Shivakumar Angadi, Diddharth Kumar Pradhan, Sandur Prakash, Jayakrushna

- Mohanty, *Characterization and recovery of copper value from discarded slag*, Waste management & Research m28(2010) 561-567.
7. Sanchez, M., Sudbury, M., *Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management*. J. Min. Metall. Sect. B-Metall. 49(2) B(2013) 161- 168.
 8. Gorai, B., Jana, R.K. Premchand, *Characterization and utilisation of copper slag- a review*. Resources, conservation and recycling 00 (2003)1-15
 9. Rivera, S., *Proyecto multidisciplinario de recuperación de energía desde escoria de cobre Fundida*, SKM, Sinclair Knight Merz, empresa de ingeniería australiana, filial Chile, 2009. Company private registre.
 10. Rivera, S., *Granallador de escoria, recuperador de energía, Codelco, El salvador, Chile*, 2011. Company private registre.